VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN DER DETAILERKENNBARKEIT UND DER OBJEKTIVEN KENNGRÖSSEN ABBILDENDER SYSTEME AM BEISPIEL DER RÖNTGENSCHIRMBILDPHOTOGRAPHIE

SIEGHARD GALL

MÜNCHEN

1971

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN DER DETAILERKENNBARKEIT UND DER OBJEKTIVEN KENNGRÖSSEN ABBILDENDER SYSTEME AM BEISPIEL DER RÖNTGENSCHIRMBILDPHOTOGRAPHIE

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig - Maximilians - Universität München

vorgelegt von

Sieghard Gall

aus Niederlangenau

München , 3.6. 1971

II. Automatisches Abtastphotometer 70

1. Konzept des Photometers 70

2. Optischer und mechanischer Aufbau 75

3. Schalt- und Meßelektronik 77

4. Meßverfahren und Auswertung 89

5. Messungen an den Rauschstrukturen des Schirmbildsystems 92

D. Ergebnisse der Schwellenmessungen und Vergleich mit Berechnungen und objektiven Messungen 100

I. Subjektive Messungen mittels der Testapparatur 100

1. Erkennbarkeitsfunktionen der Röntgenschirmbildsysteme 100

2. Erkennbarkeitsfunktionen von Landoltringen mit und ohne unterlegte Rauschstrukturen 104

3. Subjektive Kennzeichnung der auftretenden Rauschstrukturen 108

II. Möglichkeiten der Kombination Abtastphotometer-Computer zur Bildanalyse 111

1. Signalerkennung bei Gaußschem Rauschen 111

2. Möglichkeiten der Apparatur 113

3. Vergleich der Computererkennbarkeit mit subjektiven Schwellen 115

E. Zusammenfassung 117

F. Literaturverzeichnis 119

G. Anhang: Algol-Programme 128

A. Einleitung

Die vielen Untersuchungen über die Wahrnehmung optischer Signale durch den menschlichen Gesichtssinn haben bis jetzt noch zu keiner einigermaßen geschlossenen Beschreibung des Sehvorgangs in der Art einer allgemeinen Reiz-Empfindungsfunktion geführt. Die Vielzahl der Bausteine und die Komplexität der Verschaltung neuronaler Elemente des dem optischen System nachfolgenden neurophysiologischen Bereichs und der tieferen Bereiche des Gehirns, lassen auch zunächst keine einfachen Zusammenhänge erwarten.

Die vielfältigen Probleme der Signalerkennung z.B. in Rauschstrukturen wie Auswertung von Röntgen-, Luft- und Radarbildern, um nur einige praktische Anwendungsbeispiele zu nennen, lassen dessen ungeachtet nach neuen und weiteren Methoden zur Verbesserung der Erkennbarkeit von Signalen suchen.

Die Einbeziehung der aus der elektrischen Nachrichtentheorie übernommenen optischen Frequenzanalyse und -Filterung brachte erhebliche Vereinfachung und Objektivierung in die Betrachtung optischer Teil- und Gesamtsysteme, konnte sich aber nicht voll auswirken, da eine allgemeine Beschreibung des menschlichen Gesichtssinns in dieser Sprache nicht vorliegt. Das optische System, das Auge, ist von einer ganzen Anzahl Autoren durch optische Übertragungsfunktionen beschrieben worden (SCHADE, RÖHLER, OOUE, etc.). Die Forschungen auf neurophysiologischem Gebiet (HUBEL, WIESEL) an visuellen System von Versuchstieren ergeben jedoch recht vielschichtige Strukturen und auch die phänomenologischen Untersuchungen der Erkennbarkeit von Sinusrastern führen zu keiner geschlossenen Beschreibung des visuellen Systems. Unter stark vereinfachten Prämissen wie lineare Superponierbarkeit der Reize etc. wird von einigen Autoren daraus ein Punktbild errechnet, um wiederum unter vorausgesetzter Linearität Wahrnehmungsstrukturen anderer Objekte zu gewinnen. Dies findet vor allem im Hinblick auf die gewählten Voraussetzungen in der Literatur deutlichen Widerspruch.

Unter diesen Gegebenheiten erscheint es sinnvoll, erst durch phänomenologische Untersuchungen an der Erweiterung des Materials über die Erkennbarkeit von Signalen bei den verschiedenen Parametern, in dieser Arbeit sind die Parameter Signalgröße, Übertragungssystem und Rauschstruktur, zu arbeiten.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt für diese Arbeit ist auch die Frage, inwieweit gerade die Erkennbarkeit von Signalen innerhalb von Rauschstrukturen durch den Einsatz von Maschinen (Abtastphotometer + Computer) gegenüber dem menschlichen Beobachter erhöht werden kann. Neben der Erhöhung der Erkennbarkeit von Signalen sind Überlegungen natürlich auch darauf gerichtet, durch eine möglichst hohe Lesegeschwindigkeit der Maschine eine entsprechend hohe Effektivität gegenüber dem menschlichen Beobachter zu gewinnen.

Eine neuere Arbeit auf diesem Gebiet (FUKUSHIMA) zeigt eine interessante Wechselbeziehung: Neurophysiologische Ergebnisse über die Verschaltung von Neuronen dienen dabei als Modell für den Entwurf eines Lesecomputers. Gerade diese neurophysiologischen Ergebnisse aber lassen die Betrachtung des visuellen Systems im Sinne eines Punktbildes und linearer Superposition als etwas willkürlich erscheinen. Deshalb wird auch in dieser Arbeit von einer expliziten Formulierung eines Gesamtübertragungssystems, bestehend aus physikalischem Übertragungssystem und Gesichtssinn abgesehen und nur das physikalische System in der Sprache der optischen Übertragung beschrieben, während die Aussage über das Gesamtsystem durch Erkennbarkeitsfunktionen gegeben wird.

Das praktische physikalische System ist ein Röntgenschirmbildsystem mit nachfolgender Projektionsvorrichtung. Gerade in der Röntgendiagnostik tritt die praktische Bedeutung der Detailerkennbarkeit und auch die vielfachen darauf wirkenden Einflüsse deutlich zutage (SCHOBER, RÖHLER, ANGERSTEIN, SPIEGLER, GAJEWSKI, HOLM, LISSNER, NAWIJN etc.). Infolge der biologischen Strahlenwirkung ist man bekanntlich bemüht, Röntgenauf-

nahmen und -untersuchungen am Menschen mit möglichst geringer Strahlendosis vorzunehmen. Wie bei allen Systemen besteht auch hier eine Abhängigkeit zwischen Empfindlichkeit und Genauigkeit (Bildgüte) des Empfängers. Neben der Verschlechterung der Bildgüte durch eine Verwaschung der Bildstrukturen fällt hier wesentlich das optische Rauschen (Quanten-, Schirm-Filmrauschen etc.) ins Gewicht (ROSSMANN, ALBRECHT, MORGAN, LISSNER). Die Frage nach dem optimalen Empfänger, der bei zuverlässiger Erkennbarkeit der diagnostisch wichtigen Bildstrukturen eine möglichst große Empfindlichkeit aufweist, d.h., mit möglichst geringer Strahlenbelastung des Patienten auskommt, ist daher von großer Bedeutung. Damit ist das Problem auf die Frage nach den "diagnostisch wichtigen Bildstrukturen" verschoben, die durch die Aufgabenstellung bedingt sind, ob es sich z.B. um eine Lungenaufnahme mit Details recht unterschiedlicher Größe und Struktur von recht geringem Kontrast oder um eine Magenaufnahme mit Kontrastmittel von naturgemäß hohem Kontrast handelt (STIEVE, PFEILER, REISS, SCHOTT). Erschwert wird die Aufgabe auch noch dadurch, daß durch die Röntgenprojektion eine Überlagerung der zu untersuchenden Bereiche (z.B. der Lunge) durch die davor und dahinter gelegenen Gewebe erfolgt.

Serienuntersuchungen zur Detailerkennbarkeit wurden wegen der biologischen Strahlenwirkung schon sehr früh an sogenannten Röntgenphantomen durchgeführt. Diese Röntgenphantome bestehen meist aus einem Streukörper (Wasser oder Kunststoff), der das Absorptions- und Streu-Verhalten des menschlichen Körpers simulieren soll und darin befindlichen künstlichen Details (SCHOBER, BURGER, CHANTRAINE, NELSON). Das Kernproblem beim Entwurf solcher Phantome besteht nun natürlich in einer möglichst guten Anpassung der künstlichen Details an natürliche diagnostisch wichtige Details.

Neben den Anforderungen von der praktischen Seite der Röntgendiagnostik müssen bei der Auslegung des Übertragungssystems, an dem die Untersuchungen durchgeführt werden, auch die Voraussetzungen beachtet werden, unter denen die optische Übertragungstheorie auf die Gesamtübertragungskette angewandt werden kann.

Durch Messung objektiver Funktionen und Kenngrößen, weitere Berechnungen und physiologische Testmessungen werden Aussagen über die verschiedenen Einflüsse auf die Detailerkennbarkeit, deren Kennzeichnung und Optimierung erreicht.

B. Optische Übertragungskette des Röntgenschirmbildsystems

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Übertragungskette setzt sich aus drei Teilsystemen zusammen: (Abb. 1):
Röntgenschirmbildanordnung (A), physiologische Testanordnung (B) und visuelles System (C). Die Verkettung der Einzelglieder innerhalb (A) und (B) ist linear, während die Verkettung (A) - (B) wegen der Schwärzungskurve und die Verkettung (B) - (C) bzw. (C) selbst durch das visuelle System nicht linear ist.

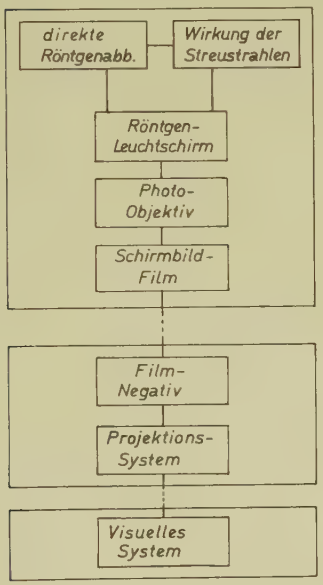


Abb. 1:
Schema zur Übertragungskette des Gesamtsystems.

I. Übergeordnete Gesichtspunkte bei der Auslegung des Übertragungssystems

Im wesentlichen sind zwei Forderungen zu erfüllen: Das Testsystem soll in Dimensionierung und Anordnung so gewählt sein, daß praktische Rückschlüsse auf die Röntgen-Schirmbild-Diagnostik möglich sind, zum anderen sollen auch die Voraussetzungen zur Anwendung der optischen Übertragungstheorie auf diese Übertragungskette erfüllt sein.

I. 1. Anforderungen von der praktischen röntgendiagnostischen Seite

Die Schirmbildphotographie als Sparte der allgemeinen Röntgendiagnostik hat ihre großen Vorteile gegenüber Großaufnahmen in der großen Aufnahmezahl, ermöglicht durch einfache Archivierung,sehr rationelle Bearbeitungsmethode und geringe Filmkosten. Die Röntgendiagnostik der Lunge im Rahmen von Reihenuntersuchungen hat deshalb auch heute noch große Bedeutung. Nachteile gegenüber der Großaufnahme sind die um einen Faktor 2-3 höhere Strahlenexposition des Patienten und die etwas verminderte Detailerkennbarkeit. Von dieser Seite her ist die Frage nach der Schirm-Film-Kombination mit möglichst guter Detailerkennbarkeit bei mäßiger Strahlenbelastung sehr wichtig. In der verwendeten Aufnahmekette wurden deshalb 3 verschieden- empfindliche Leuchtschirme mit 5 verschiedenen Schirmbildfilmen kombiniert. Die Gesamtanordnung sollte in der Dimensionierung der Elemente möglichst den Schirmbildapparaturen der Praxis angeglichen sein, um vergleichbare Verhältnisse zu schaffen.

Das Schirmbildverfahren besteht bekanntlich aus einem Röntgenstrahlengang, -die vom Fokus der Röntgenröhre ausgehende Strahlung durchsetzt teilweise den Körper des Patienten und erzeugt auf einem Leuchtschirm ein entsprechendes Bild-, und einer Kamera, die dieses Bild optisch verkleinert auf speziell für den Spektralbereich des Schirms sensibilisierten Film abbildet. Bei den Systemen der mobilen Schirmbildwagen ist die Leuchtschirmabmessung 50 x 50 cm^2 (früher 30 x 40 cm^2), die Optik ist ein spezielles äußerst lichtstarkes Spiegel- oder Linsensystem und der Film ist hochempfindlicher 70 mm (auch noch 35 mm) -Film. Die Spannung der Röntgenröhre wird entsprechend der zu durchstrahlenden Gewebedicke zwischen 80 und 120 kV vorgewählt, die eigentliche Belichtung wird automatisch gesteuert. Neuerdings berichten Autoren (ANGERSTEIN) auch über eine Ausweitung des Anwendungsgebietes der Schirmbildaufnahmen durch Übergang vom 70 mm Film zum 110 mm Film. Hierbei werden Aufnahmen bei 120 kV unter Verwendung eines 6:1 Rasters bei 100 cm Fokus-Schirm-Abstand gemacht.

Die physikalischen Bedingungen der Testapparatur wurden weitgehend daran orientiert: Die Röntgenröhre wurde bei 110 kV im Sechsventilbetrieb gefahren unter Vorfilterung der Strahlung durch insgesamt etwa 9 mm Aluminium zur Homogenisierung der Strahlung. Fokus-Schirm-Abstand war 100 cm, zur Verringerung des bildwirksamen Streustrahlenanteils wurde außerdem ein Feinraster 1:10 verwendet. Der Leuchtschirm von den Abmessungen 15 x 20 cm wurde auf 35 mm Film verkleinert, dies entspricht recht gut dem Abbildungsmaßstab normaler Röntgenschirme auf 70 mm Film. Die Abbildungsoptik war bei weitem nicht so lichtstark wie moderne Schirmbildobjektive, sie wurde zudem zur Realisierung einer über die gesamte Abbildungsebene möglichst gleiche Übertragungsfunktion abgeblendet. Diese Abweichung ist durch die zu erfüllende Isoplanasiebedingung notwendig.

Um eine gültige Aussage über die Abhängigkeit der Bildgüte von den verschiedenen Schirmen bzw. Filmen zu erhalten, muß zunächst das als Kriterium dienende Objekt festgelegt werden. Ein natürliches Objekt scheidet aus zwei Gründen aus: die Strahlenbelastung ist bei wiederholten Aufnahmen dem Patienten unzumutbar, natürliches Gewebe ist materiell nicht reproduzierbar und verursacht beim Beobachter einer Aufnahmeserie unter verschiedenen Bedingungen ein a priori Wissen. Dadurch kann gerade bei geringen Bildgüteunterschieden zweier Systeme kaum eine objektive Aussage darüber, welches System die diagnostisch wichtigen Details besser erkennen lässt, erwartet werden.

Künstliche Objekte, sogenannte Röntgenphantome, weisen demgegenüber viele Vorteile auf: sie sind reproduzierbar, Details können in definierten Abstufungen hergestellt werden, Strahlenbelastung spielt keine Rolle, die Handhabung ist einfach, durch verschiedene Anordnung der Einzeldetails vor jeder Aufnahme kann ein undefiniertes a priori Wissen ausgeschlossen werden. Eine allerdings wesentliche Forderung kommt bei Phantomen hinzu: die künstlichen Details sollen sich möglichst ähnlich den natürlichen diagnostisch wichtigen Details verhalten, d.h. eine möglichst hohe Korrelation zwischen der Erkennbarkeit von Phantomdetails und der für

die Diagnose wichtigen Details einer praktischen Aufnahme unter gleichen Aufnahmebedingungen ist gefordert. Die Objektivierung der sogenannten diagnostisch wichtigen Details einer Lungenaufnahme scheint äußerst schwierig zu sein. Für den Laien kaum zu unterscheidende deutliche Strukturen zweier Aufnahmen haben für den Arzt völlig entgegengesetzte diagnostische Aussagen, während eine für den Laien unauffällige Aufnahme dem Arzt auf grund eines gegenüber dem Normalen etwas verschiedenen Gesamteindrucks als Krankheitsbild auffällt. Auch in der Literatur ist aus diesen Gründen keine Objektivierung dieser Details zu finden. Als praktikabler Weg bleibt die Verwendung eines bewährten Phantoms, dessen Detail-Erkennungsrate unabhängig vom verwendeten Abbildungssystem kovarinat der Erkennbarkeit wichtiger Details einer Thoraxaufnahme ist. Das hier verwendete Ringphantom nach SCHOBER ist speziell für die Thoraxdiagnostik entwickelt worden und erfüllt die obige Forderung. Es besteht aus einer Plexiglasplatte mit einer matrixartigen Anordnung drehbarer Scheiben, bestückt mit Landoltringen (Abb.2) verschiedener Größen und Dicken aus Aluminium und Plexiglas, und einem Plexiglasstreukörper zur Simulation des Absorptions- und Streuverhaltens eines menschlichen Normalthorax. Die Testplatte enthält 7 verschiedene Ringklassen mit Schlitzbreiten von 0.5 bis 5 mm. Die Testzeichen sind in ihrer Stärken- und Häufigkeitsverteilung so ausgelegt, daß die Gesamtzahl der unter den verschiedenen Aufnahmebedingungen erkannten Landoltringe ein sinnvolles Maß der Abbildungsgüte auch für die praktische diagnostische Aufnahme ist.

Abb. 2: Landoltring.

Das Phantom nach Schober wurde zur Untersuchung der Detailerkennbarkeit für eine große Parameterschar eingesetzt wie kV-Zahl, mAs-Produkt, Aufnahmegeometrie, Verwendung von Folien, Filmschwärzung, Entwicklungs-

und Betrachtungsbedingungen etc. Für Großformat lag die Erkennungsrate meist im günstigen Aussagebereich über 50 % und unter 100 %. Beim kleinformatigen Schirmbildfilm und 50 kV Aufnahmespannung betrug die Rate 20 - 30 %. Durch Erhöhung der Aufnahmespannung auf 110 kV sinkt die Erkennungsrate bei der Original-Ringverteilung infolge der wesentlich geringeren Strahlenschwächung so weit ab, daß eine Differenzierung verschiedener Schirmbildsysteme nicht mehr möglich ist. Die Ringverteilung der Testplatte wird deshalb in der mittleren Ringdicke entsprechend den veränderten Bedingungen angehoben, außerdem wird eine empfindlichere Differenzierung durch kontinuierliche Dicken-Abstufung der einzelnen Ringgrößen ermöglicht.

1. 2. Optische Übertragungstheorie und Anwendbarkeit auf die Übertragungskette

In Analogie zur elektrischen Nachrichtentechnik wurde durch Übergang vom physikalisch realen Ortsraum zum (Orts-) Frequenzraum die optische Übertragungstheorie entwickelt.
An dieser Stelle sollen nur einige wesentliche und für das folgende wichtige Zusammenhänge wiedergegeben werden. Im übrigen sei auf die Literatur verwiesen.

Unter Voraussetzung des Linearitätsprinzips lässt sich nach der folgenden Formel (1) aus der Intensitätsverteilung $g(x,y)$ der abzubildenden Objektebene und den Punktbildern des abbildenden Systems $p(x,y;x_o-x,y_o-y)$ die Intensitätsverteilung $b(x'_o,y'_o)$ in der Bildebene formulieren:

$$b(x_o,y_o) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y)\cdot p(x,y;x_o-x,y_o-y)\,dx\,dy \qquad (1)$$

Die Koordination (x'_o,y'_o) der Bildebene sind über den Vergrößerungsfaktor V den Koordinaten (x_o,y_o) der Objektebene zugeordnet: $\begin{pmatrix} x'_o \\ y'_o \end{pmatrix} = -V\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix}$.

Damit gilt: $b(x'_o,y'_o) = b(x_o,y_o)$.

Mit der Beschränkung auf einen Isoplanasiebereich B wird das Punktbild koordinatenunabhängig und Gleichung (1) vereinfacht sich zu

$$b(x_0,y_0) = \iint_B g(x,y)\cdot p(x_0-x,y_0-y)\,dx\,dy \qquad (2)$$

Bei rotationssymmetrischen Abbildungssystemen nimmt Gl. (2) folgende Gestalt an:

$$b(x_0,y_0) = \iint_B g(x,y)\cdot p(r)\,dx\,dy \qquad (3)$$

mit

$$r^2 = (x-x_0)^2+(y-y_0)^2 .$$

Bei physikalisch realisierbaren Funktionen sind die beiden Bedingungen für die Existenz der Fouriertransformierten zu den Punktbildern praktisch immer erfüllt:

1) die Dirichletsche Bedingung, welche Stetigkeit der zu transformierenden Funktion bis auf endlich viele Sprungstellen und höchstens endlich viele Extreme im betreffenden Intervall verlangt,

2) die quadratische Integrierbarkeit, welche die Endlichkeit des Integrals

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} p^2(x_0-x,y_0-y)\,dx\,dy \quad \text{verlangt.}$$

Dann existiert die mit M bezeichnete Fouriertransformierte des Punktbildes-p(x,y), die sogenannte Modulationsübertragungsfunktion:

$$M(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} p(x,y)\cdot \exp(-2\pi i\,(ux+vy))\,dx\,dy \qquad (4)$$

Auf ein einfaches Objekt, ein lineares Sinusgitter, angewandt, stellt der Betrag $|M(u)|$ der i.a. komplexen Modulationsübertragungsfunktion den Faktor dar, um den die Modulation des Sinusgitters (u Perioden/mm) durch das abbildende System, gekennzeichnet durch p(x), vermindert wird. Ein auftretender Phasenfaktor $\varphi(u)$ gibt die Phasenverschiebung des Bild-Sinusgitters der Linienfrequenz u gegenüber der Lage bei streng geometrischer Abbildung an.

Unterwirft man auch Objekt- und Bildverteilung g(x,y) und b(x',y') obiger Fouriertransformation, so erhält man die entsprechenden Spektralfunktionen - $S_g(u,v)$ und $S_b(u,v)$. Die Ortsfrequenzen u',v' sind über den Vergrößerungsfaktor V auf u,v bezogen: $\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \frac{1}{V}\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$

Durch Fouriertransformationen der Gleichung (3) nach dem Faltungssatz kommt man zu der Beziehung

$$S_b(u,v) = M(u,v) \cdot S_g(u,v) . \tag{5}$$

Folgen in einer Kette nacheinander mehrere Teilabbildungen, bezeichnet durch $M_1(u,v)$, $M_2(u,v)$, $M_3(u,v)$ und werden in den Bild- bzw. Objektebenen die Phasenbeziehungen zerstört, so lässt sich die Gesamtkette durch eine Übertragungsfunktion

$$|M(u,v)| = |M_1(u,v)| \cdot |M_2(u,v)| \cdot |M_3(u,v)| \tag{6}$$

beschreiben. Vorauszusetzen ist natürlich neben der Existenz der Fouriertransformierten die Linearität und die Isoplanasiebedingung des betrachteten Objektraums. Für ein rotationssymmetrisches System kann die MÜF durch eine Ortsfrequenzvariable v beschrieben werden:

$$M(v) = \int_{r=0}^{\infty} \int_{\varphi=0}^{2\pi} p(r) \cdot \exp(-2\pi i v r \cos\varphi) \, r \, dr \, d\varphi \tag{7}$$

Mit $\exp(-2\pi i v r \cos\varphi) = \exp(2\pi i v r \cos\varphi)$ erkennt man darin die Integraldarstellung der Besselfunktion o-ter Ordnung:

$$J_0(2\pi v r) = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \exp(2\pi i v r \cos\varphi) \, d\varphi . \tag{8}$$

Damit ergibt sich die Gleichung für das rotationssymmetrische System als

$$M(v) = 2\pi \int_{r=0}^{\infty} p(r) \cdot J_0(2\pi v r) \, r \, dr . \tag{9}$$

Die Rücktransformation hat die gleiche Form

$$p(r) = 2\pi \int_{v=0}^{\infty} M(v) \cdot J_0(2\pi v r) \, v \, dv , \tag{10}$$

während die allgemeine Rücktransformation vom Frequenzraum in den Ortsraum einen Wechsel im Vorzeichen aufweist:

$$p(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M(u,v) \cdot \exp(2\pi i (ux + vy)) \, du \, dv . \tag{11}$$

II. Aufbau des Gesamtübertragungssystems

Aus Abb. 3 geht der schematische Aufbau des Gesamtübertragungssystems hervor. Die erste Stufe ist eine Röntgenprojektion des Phantoms auf einen Leuchtschirm. In der zweiten Stufe wird die Leuchtschirmebene durch ein Photoobjektiv in eine Filmebene 1:6 verkleinert abgebildet. Nach dem Entwicklungsprozess werden die Negative mit einer für diesen Zweck gebauten Testvorrichtung projeziert, zur Bestimmung der Detailerkennbarkeit für die verschiedenen Abbildungssysteme. Die Variation der Abbildungssysteme erfolgt durch Kombination von 3 verschiedenen Leuchtschirmen und 5 verschiedenen Schirmbildfilmen. Die übrigen Glieder der Übertragungskette bleiben unverändert.

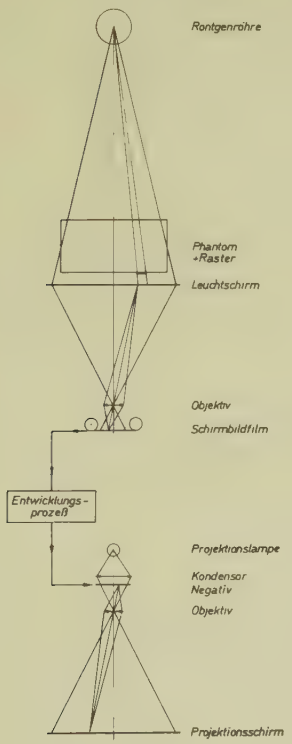


Abb. 3:
Gesamtübertragungssystem

B. II. 1. Aufnahmeapparatur

Abb. 4 zeigt die Aufnahmeapparatur in Aufsicht. In einem lichtdichten Kasten befindet sich in festem Abstand vor dem Leuchtschirm das Phantom, dazwischen das Streustrahlenraster. Der Leuchtschirm wird von der Kameraoptik auf 35 mm-Schirmbildfilm abgebildet.

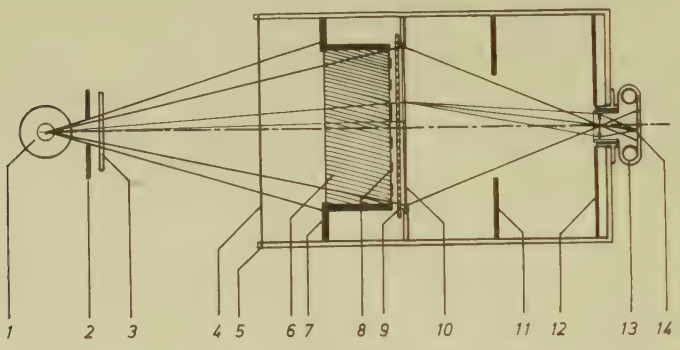


Abb. 4 Schematische Darstellung der Aufnahmeanordnung:

1 Röntgenröhre 1.2 mm Fokus, 110 kV, 2 Tiefenblende, 3 Aluminiumfilter 7.5 mm, 4 Aluminiumplatte 1.5 mm, 5 lichtdichtes Gehäuse 15x20cm2, 95 mm dick, 6 Streukörper des Phantoms, 7 Bleiabschirmung, 8 Testplatte des Phantoms, 9 Streustrahlenraster 44 Lamellen/cm, Ratio 10, 10 Röntgenleuchtschirm, 11,12, Bleiblenden, 13 Kamera mit Objektiv, 14 Schirmbildfilm.

Die Röntgenröhre wird mit dem 1.2 mm Fokus im Durchleuchtungsbetrieb bei 110 kV gefahren. Ein Aluminiumfilter am Röhrengehäuse bewirkt zusammen mit der röhrenseitigen Gehäusewand der Aufnahmeapparatur (aus Aluminium) eine Aufhärtung und Homogenisierung der Röntgenstrahlung. Das verwendete Feinraster mit 44 Lamellen/cm und Ratio = 10 ist auf 100 cm fokussiert. Durch Anschieben und Arretierung der Röhre an einen mit der Aufnahmeapparatur verbundenen Rahmen ist die genaue Einhaltung und Reproduzierbarkeit der Fokuslage gewährleistet. Eine Abweichung der Fokuslage würde die Transmission des Rasters für die Primärstrahlung verringern und bei stärkerer Defokussierung in Achsenrichtung eine Abschattung des Bildrandes bewirken.

Der Abstand zwischen Raster und Leuchtschirm ist sehr gering (einige mm), der Abstand Phantom-Leuchtschirm beträgt 22 mm.

Die Leuchtschirmhalterung gestattet eine reproduzierbare, ebene Aufnahme der verschiedenen Schirme und einfaches Auswechseln. Die verwendeten Leuchtschirme selbst werden in II.4 besprochen.

Die Kamera, ein Leica-Gehäuse mit einem Schneider Xenotar 2.8/75mm ist durch eine Paßsitzhalterung lichtdicht und reproduzierbar an der Außenwand des Gehäuses angebracht.

Der Streukörper des Röntgenphantoms ist seitlich mit Bleiplatten umgeben, um die Raumstreustrahlung möglichst gering zu halten. Der Primärstrahlenkegel wird über die am Röhrengehäuse befindliche Tiefenblende so eingestellt, daß die ganze Phantomöffnung ($15 \times 20\ cm^2$) ausgefüllt ist. Die zwischen Leuchtschirm und Kamera befindlichen Bleiblenden dienen wie die Bleiplatten am Streukörper der Absorption unerwünschter Raumstreustrahlung. Damit wird gewährleistet, daß Artefakte etwa in der Form einer direkten Einwirkung von Röntgenstrahlen auf den Schirmbildfilm vermieden werden.

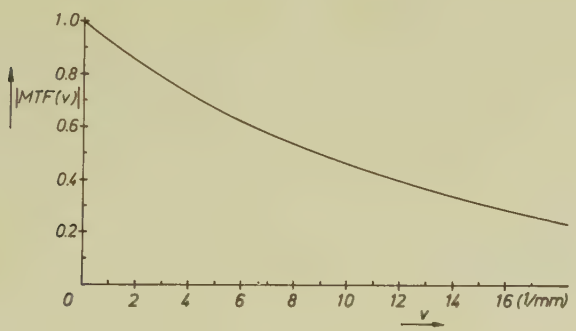


Abb. 5: Modulationsübertragungsfunktion des abbildenden Objektivs Xenotar/75 mm bei Blende 5.6 .

Ein wichtiges Glied in der Übertragungskette ist auch das Objektiv zur verkleinerten Abbildung des Leuchtschirms in die Ebene des Schirmbildfilms. An der Apparatur zur MÜF-Messung nach dem Moire-Verfahren von H.Sapper wurden mehrere in engere Wahl kommende Objektive für das gewünschte Ab-

bildungsverhältnis 1:6 durchgemessen und zwar im axialen Bereich als auch unter verschiedenen Bildwinkeln. Als am besten geeignet erwies sich das Objektiv Xenotar, 75 mm/2.8 von Schneider mit einer kritischen Blende von 5.6 . Dabei zeigte auch die Męssung der MÜF beim maximalen Bildwinkel der Anordnung (Bilddiagonale 12.5°) keine wesentliche Abweichung gegenüber der Achsenmessung.

In Abb. 5 ist die Modulations-Übertragungsfunktion des Objektivs bei optimaler Fokussierung und kritischer Blende 5.6 wiedergegeben. Die Ortsfrequenzen sind auf die Leuchtschirmebene bezogen. Die entsprechenden Ortsfrequenzen der Filmebene ergeben sich durch Multiplikation mit dem Faktor 6. Die Justierung des Abbildungssystems Leuchtschirm- Schirmbildfilm wurde lichtoptisch vorgenommen. Anstelle des Schirms befand sich in der Halterung eine dünne Glasplatte mit diagonal angeordneten verkleinerten Siemenssternen. Die Ausleuchtung der Testanordnung erfolgt durch einen Lichtkasten, dessen spektrale Verteilung durch eine grüne Folie an die spektrale Verteilung des Leuchtschirms angepasst war. Das Objektiv wurde nun, von der ungefähren Scharfeinstellung ausgehend in Stufen von 1/8 mm verstellt und diese Defokussierungsreihe bei verschiedenen Blendeneinstellungen auf Feinstkornfilm aufgenommen. Anhand der Aufnahmen konnte die Schirmhalterung gegenüber der Kamera feinjustiert werden unter Bestimmung der optimalen Objektiveinstellung bei gleichguter axialer und außeraxialer Abbildung.
Die Erfüllung der Isoplanasiebedingung war damit für diesen Teil der Abbildungskette sichergestellt.

II. 2. Das Röntgenphantom

Das Röntgenphantom besteht aus Plexiglasstreuplatten und einer Detailplatte. Die Dicke des Phantoms beträgt 95 mm, die Platten sind 15x20 cm^2 groß. Die Streuplatten und die Detailplatte werden von einem Kasten gehalten, der innen und auf der Vorderseite (im Aufnahmebetrieb zur Röntgenröhre hin gerichtet) mit Bleiplatten belegt ist. Um die geometrische Unschärfe der Röntgenabbildung, die ja bei ausgedehnten Objekten zum Bildrand hin stark zunimmt und damit die Isoplanasiebedingung verletzen würde, möglichst gering zu halten, befindet sich die Detailplatte direkt auf der zum Leuchtschirm gewandten Seite des Phantoms. Wie oben bereits erwähnt, muß für die Untersuchung der Schirmbildkette das Dickenniveau der Landoltringe gegenüber der Originalbestückung des Schoberphantoms entsprechend den veränderten Bedingungen angehoben werden. Gleichzeitig wird eine feinere Abstufung der Ringdicken vorgenommen, um über eine integrale Erkennbarkeitsaussage hinaus ein bezüglich der verschiedenen Ringgrößen klassifiziertes Ergebnis zu erhalten und die Unterscheidung nur wenig verschiedener Systeme zu ermöglichen.

Die Detailplatte weist entsprechend dem Schober-Phantom 7 verschiedene Ringklassen auf, die mit Ziffern 1 - 7 bezeichnet seien:

Ringklasse :	1	2	3	4	5	6	7
Ringdurchm.außen (mm):	25	15	10	7.5	5.0	3.5	2.5
Ringdurchm.innen (mm):	15	9	6	4.5	3.0	2.1	1.5
Schlitzbreite (mm):	5	3	2	1.5	1.0	0.7	0.5

Mittels Probeaufnahmen wurde das ungefähre Dickenniveau der Landoltringe, bei denen die Stellung des Ringschlitzes gerade erkannt wird, bestimmt. Es zeigte sich, daß eine Erhöhung der Dicke von Plexiglasringen weit über 1 mm hinaus nötig wäre, ebenso bei den kleinen Aluminiumringen. Nach oben ist der Dickenbereich eingegrenzt durch die mit der Ringdicke zunehmende geometrische Unschärfe, die sich besonders bei außeraxialen Ringen entgegen der geforderten Isoplanasiebedingung auswirken würde. Für die Ringklassen (1) bis (6) wurde ein Sortiment Aluminium-Landoltringe steigender Dicke

bis zu einem Maximalwert von 1.2 mm hergestellt. Für die beiden kleinsten Ringklassen (6) und (7) wurden zusätzlich Ringe aus Kupfer-Folie und -Blech gefertigt, die den Dickenbereich der Aluminiumringe nach oben fortsetzen.

Über Vorversuche wurde die Auswahl des sinnvollen Arbeitsbereichs vorgenommen, das Dickenniveau verschiebt sich wie zu erwarten von Ringklasse (1) bis (7) nach höheren Werten. Die ideale Bestückung der Detailplatte mit Landoltringen ist dann erreicht, wenn bei der besten Übertragungskette die dicksten Ringe jeder Klasse noch nicht erkannt werden, während bei der schlechtesten Übertragungskette gerade die dünnsten Ringe jeder Klasse erkannt werden. Zur Einhaltung eines gewissen Sicherheitsabstandes nach oben und unten, der nicht auf Kosten einer gröberen Staffelung der Ringdicken einer Klasse geht, wurde bei aufeinanderfolgenden Aufnahmen einer Übertragungskette vorsorglich der Dickenbereich nach beiden Richtungen durch Austausch der auf den Drehkörpern fixierten Ringe erweitert.

Die Normalbestückung erfolgt auf der Detailplatte des Schoberphantoms, deren Drehkörper mit den Ringen gegen die Drehkörper dieser Untersuchung ausgetauscht werden. Das Phantom wird praktisch so gehandhabt, daß die einzelnen Landoltringe möglichst statistisch gedreht werden, die Stellung der einzelnen Ringschlitze festgehalten wird und bei den Erkennbarkeitstests der Beobachter die Ringstellung durch Angabe der Uhrzeigerstellung benennt. Bei der Normalbestückung sind nur je 2 Ringe der Klassen (1) und (2) mit entsprechend größerem Drehkörper vertreten. Das hat beim Schober-Phantom seine Berechtigung, da die Häufigkeit der verschiedenen Ringklassen auf die praktisch vorkommende Größenverteilung diagnostisch wichtiger Details bezogen ist. In dieser Untersuchung wurde eine Zusatztestplatte für die Klassen (1) und (2) angefertigt. Sie besteht aus 5 vertauschbaren Plexiglasstreifen mit je 4 Ringen, abwechselnd (1) und (2).

Die Anordnung der einzelnen Ringe jeder Klasse wurde im Wechsel mittlerer Bereich -äußerer Bereich der Detailplatte durchgeführt, um etwaige systematische Abweichungen der Bildqualität über die Bildebene - hier werden alle Abweichungen der Kette summiert und erfasst - zu erkennen und auszugleichen. Das ist ein praktisches Prüfverfahren für die Isoplanasie-

bedingung. Die Aufnahmeanordnung wurde von vornherein so ausgelegt, daß die Abbildungseigenschaften der einzelnen Übertragungsketten über die Bildebene möglichst konstant gehalten wurden. Bei der Auswertung zeigte sich dann auch, dies sei hier vorweggenommen, daß kein Unterschied der Bildqualität über die Bildebene festgestellt werden konnte, die Isoplanasiebedingung also für die gesamte Bildebene erfüllt ist. Darin ist eingeschlossen, daß geringe gegenläufige Abweichungen der Einzelsysteme vorhanden sein können, etwa geometrische Unschärfe durch Detaildicke und Reststreustrahlung, die sich im Gesamtsystem, und darauf kommt es ja an, aufheben.

II. 3. Röntgenstrahlengang

Die vom Röhrenfokus ausgehende Primärstrahlung wird durch das Röntgenphantom geschwächt, ein Teil wird absorbiert, der andere gestreut, und erzeugt auf dem Leuchtschirm eine der Strahlenintensität I_p proportionale Leuchtdichte B.

Während die Primärintensität vor dem Röntgenphantom I_o beträgt, gelangen die Anteile I_p der Primärstrahlung und I_s der Streustrahlung auf den Leuchtschirm. Durch den Streustrahlenraster wird der bildwirksame Streustrahlenanteil auf I'_s verringert, während die Primärstrahlung auf I'_p reduziert wird.

Für die in dieser Arbeit verwendete Röntgenanordnung

Röhrenspannung:	110 kV, 4-Ventilbetrieb
Vorfilter:	9 mm Aluminium
Streukörper:	Plexiglas, 150 x 200 mm^2, 95 mm dick
Feinraster:	44 (L/cm), Ratio 10, auf 100 cm fok.
Streukörper-Schirmabstd:	22 mm
Fokus-Schirm-Abstand:	100 cm

wurden die Quotienten Streustrahlenintensität/Primärintensität bestimmt. Zur Messung wurde die Streustrahlenkammer von Siemens in Verbindung mit dem Siemens-Universaldosimeter verwendet. Der rel. Streuanteil ohne Raster beträgt danach $I_s/I_p = 2.0$, die Transparenz T_p des Rasters für Primärstrahlung ergibt sich zu $T_p = I'_p/I_p = 0.67$, während die Transparenz T_s des Rasters für die Streustrahlung der Anordnung $T_s = I'_s/I_s = 0.157$ ausmacht.

Damit errechnet sich der rel. Streuanteil der Anordnung mit Raster zu

$$\frac{I_s'}{I_p'} = \frac{I_s' \cdot I_p \cdot I_s}{I_s \cdot I_p' \cdot I_p} = \frac{T_s}{T_p} \cdot \frac{I_s}{I_p} \quad . \qquad (12)$$

bzw. mit obigen Werten für I_s/I_p , T_p und T_s zu $I_s'/I_p' = 0.47$.

Der rel. Streuanteil wird also durch den Raster auf das T_s/T_p -fache des Anteils ohne Raster reduziert. Das Verhältnis T_s/T_p erweist sich danach als eine für die Brauchbarkeit des Rasters mitbestimmende Kenngröße. Der reziproke Wert T_p/T_s ist in der Literatur (HONDIUS BOLDINGH) als Selektivität Σ definiert. Eine vorallem für die Transmission der Streustrahlung wichtige mechanische Größe ist das sogenannte Schachtverhältnis r (ratio) des Rasters: Es definiert das Verhältnis Lamellenhöhe/ Lamellenabstand. Eine weitere häufig gebrauchte Größe zur Rasterkennzeichnung, der Bucky-Faktor B, gibt an, um wieviel höher die Exposition bei Verwendung des Rasters unter sonst gleichen Bedingungen sein muß:

$B = (I_s + I_p)/(I_s' + I_p')$.

Der verwendete Raster lässt sich damit wie folgt kennzeichnen:

Selektivität $\Sigma = 4.3$, Bucky-Faktor $B = 3.0$, Schachtverhältnis $r = 10$.

Bekanntlich wird die Strahlenschwächung durch ein Objekt der Dicke d mittels der Beziehung

$$I = I_p \cdot \exp(-\mu(d) \cdot d) \qquad (13)$$

beschrieben. Bei homogener Röntgenstrahlung ist der Schwächungskoeffizient μ von der Schichtdicke d unabhängig und Gleichung (13) vereinfacht sich zu

$$I = I_p \cdot \exp(-\mu \cdot d) \, . \qquad (14)$$

Interessiert der Bildkontrast zweier benachbarter Felder, deren Materialien durch μ_1 und μ_2 bezeichnet seien, so er rechnet sich die relative Intensität

$$I_2/I_1 = \exp(-\Delta\mu \cdot d) \quad \text{mit} \quad \Delta\mu = \mu_2 - \mu_1 \, . \qquad (15)$$

Der Strahlenkontrast der Primärstrahlung nach der allgemeinen Kontrastformel

$$K = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \qquad (16)$$

ergibt sich damit zu

$$K_p = \frac{1 - \exp(-\Delta\mu \cdot d)}{1 + \exp(-\Delta\mu \cdot d)} \quad , \qquad (17)$$

während die Streustrahlung das Primärstrahlenbild überlagert. Dabei sei angenommen, daß sich die Streuintensität I_{2s} hinter dem Objekt von der empfängerwirksamen Streuintensität I_{1s} der Umgebung unterscheiden kann: $I_{2s} = g \cdot I_{1s}$ mit $0 \leq g \leq 1$. Damit folgt für den Strahlenkontrast der Gesamtstrahlung nach Formel (16)

$$K_{ps} = \frac{1 - \exp(-\Delta\mu \cdot d) + (1-g) \cdot I_s/I_p}{1 + \exp(-\Delta\mu \cdot d) + (1+g) \cdot I_s/I_p} \quad . \qquad (18)$$

Für schwachen Objektkontrast K_p kann g = 1 gesetzt werden und mit $\exp(-\Delta\mu \cdot d) \approx 1$ folgt aus Gleichung (18)

$$K_{ps} = \frac{1 - \exp(-\Delta\mu \cdot d)}{2 \cdot (1 + I_s/I_p)} \quad , \qquad (19)$$

bzw. als Kontrastquotient

$$\frac{K_{ps}}{K_p} = \frac{I_p}{I_p + I_s} \quad . \qquad (20)$$

Diese Beziehung wird auch als MORGANsche Formel bezeichnet. Mit obigen Meßwerten ergibt sich für Landoltringe geringer Strahlenschwächung eine Kontrastminderung durch Streustrahlen auf 33 % des Primärkontrasts. Bei Einbeziehung des Rasters mit einem Kontrastverbesserungsfaktor

$$\frac{K_{ps}'}{K_{ps}} = \frac{1 + I_s/I_p}{1 + I_s'/I_p'} \quad , \qquad (21)$$

bzw. mit Gleichung (12)

$$\frac{K_{ps}'}{K_{ps}} = \frac{1 + I_s/I_p}{1 + (T_s/T_p) \cdot (I_s/I_p)} \quad , \qquad (22)$$

der hier 2.0 beträgt, folgt daraus eine Kontrastminderung auf 66% des Primärkontrasts.

Neben dieser einfachen Beschreibung der Kontrastminderung von Schwellenkontrasten tritt bei größeren undurchlässigeren Objekten durch Bezugnahme auf Gleichung (18) ein wesentlich komplizierterer Zusammenhang. Die in Gl. (18) auftretende Parametergröße g ist selbst eine Funktion der Anordnungsgeometrie und der Objekteigenschaften. Näherer dazu wurde in einer früheren Arbeit (GALL) behandelt und soll hier nicht weiter ausgeführt werden. Dagegen wird im folgenden die Streustrahlenwirkung im Sinne von Punkt- und Spaltbildern der direkten und Streustrahlung beschrieben, um auch diesen Anteil der Röntgenabbildung in der Sprache der Übertragungstheorie zu formulieren.

Betrachtet man das Punktbild des Röntgenstrahlengangs zusammengesetzt aus dem Punktbild der direkten Strahlung $p_p(r)$ und einem Punktbild der Streustrahlung $p_s(r)$, so folgt als Beziehung zwischen beiden Größen: Die Punktbildvolumina verhalten sich wie die entsprechenden Intensitäten der Röntgenstrahlen, bzw.

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} p_s(r)\, r\, dr\, d\varphi \Big/ \int_0^\infty \int_0^{2\pi} p_p(r)\, r\, dr\, d\varphi = I_s / I_p \qquad (23)$$

Das Punktbild der direkten Strahlung $p_p(x,y)$ erhält man als Zentralprojektion des Röhrenfokus durch eine in der Objektebene (Ebene der Landoltringe) befindliche Lochblende in die Schirmebene. Bei ausgedehnten Objekten denkt man sich die Lochblende über den Dickenbereich des Objekts parallel zur optischen Achse verschoben. Zunächst sei die Objektdicke vernachlässigt. Die verwendete Röntgenröhre arbeitet mit einer Drehanode, deren Brennfleck in horizontaler Richtung vom Winkel χ gegen die Horizontalebene abhängt: Der vom Elektronenbündel getroffene Anodenteller hat eine Neigung von etwa 19° gegen die Horizontale, der thermische Brennfleck weist ein Kantenverhältnis von etwa 1:3 auf und erscheint in horizontaler Richtung ($\chi = 0$) quadratisch: $f_y(\chi=0) = 3\, f_x \cdot \sin(19^\circ) = f_x$. Für Objekte, die durch direkte Strahlen vom Winkel χ gegen die Horizontale abgebildet werden, ergibt sich:

$$f_y(\chi) = 3 \cdot \frac{\sin(19^\circ + \chi)}{\cos\chi} \cdot f_x \qquad (24)$$

Die Fokusbelegung I_f ist nicht streng gleichmäßig, ein Kantenabfall kann durch folgende Beziehung angenähert werden:

$$I_f(x) = I_f(x=0) \cdot \exp(-x^{2k}/c). \tag{25}$$

Der Exponent k ist ein Maß für die Kantensteilheit, während der Normierungsfaktor c bzgl. der effektiven Fokusausdehnung f definiert ist:

$$f \cdot I_f(x=0) = \int_{-\infty}^{\infty} I_f(x)\, dx\,. \tag{26}$$

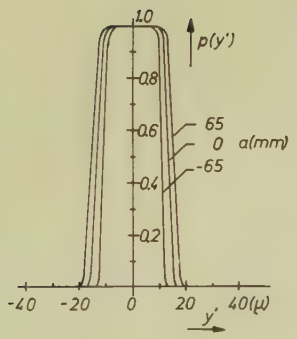


Abb. 6 Punktbildverteilung der direkten Röntgenabbildung in y - Richtung. Goetze-Fokus: 1.2 mm, Fokus-Schirm-Abstand: 1000 mm, Objekt-Schirm-Abstand: 22 mm, Objektdicke: 0 mm, Parameter: Achsenabstand a .

In Abb. 6 sind Punktbilder bei vernachlässigter Objektdicke unter Aufnahmebedingungen (Fokusschirmabstand D = 1000 mm, Objektschirmabstand Δ = 22 mm, Goetzefokus mit f_x = 1.2 mm) für den Zentralstrahl (a = 0, $\chi = 0^\circ$) und extrem außeraxiale Strahlen dieser Abbildung (a = $\pm$ 65 mm, χ = arctg $\frac{65}{1000}$ = 3.7°) entsprechend folgender Formel dargestellt:

$$p(y') = I_f\left(y' \cdot \frac{D-\Delta}{\Delta}\right)\,, \tag{27}$$

wobei sich die Konstante c entsprechend (25) und (26) berechnet, während der Exponent k = 6 die Kantensteilheit bezeichnet. Die Abszissenausdehnung des Punktbildes p(x',y') ist koordinatenunabhängig und identisch p(y') für $\chi = 0^\circ$.

Auch für die dreidimensionalen abzubildenden Landoltringe, deren Begrenzungsflächen senkrecht und parallel zur optischen Achse verlaufen, lässt sich die Berechnung der Bildverteilung auf eine zweidimensionale Grundstruktur und entsprechend modifiziertes Punktbild reduzieren:

Man denke sich das Objekt der Dicke d in infinitesimale Schichten ds gegliedert und eine Lochblende achsparallel über das Intervall d verschoben. Jede Schicht ds trägt dann entsprechend der bildwirksamen Intensität I(s) zum resultierenden Punktbild bei. Die Punktbildintensität in der Bildebene p(x') errechnet sich dann aus der Fokusverteilung $I_f(x)$ und der Funktion I(s), die bei schwacher Strahlenschwächung durch das Objekt der Dicke d als konstant betrachtet werden kann:

$$p(x') = \frac{1}{p(x'=0)} \cdot \int_{s=-d/2}^{d/2} I(s) \cdot I_f(x)\, ds \qquad (28)$$

mit $$x = x' \cdot \left(\frac{D}{A-s} - 1\right) + \frac{D}{D-A} \cdot \frac{a \cdot s}{A-s} \quad .$$

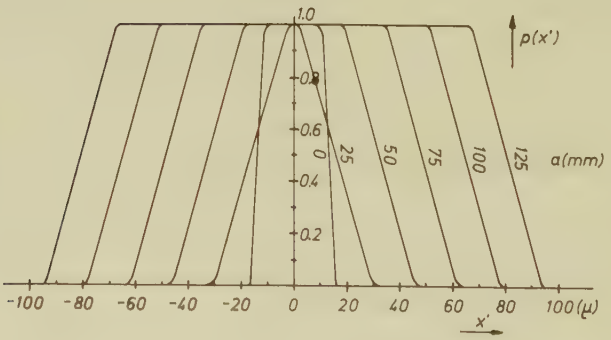


Abb. 7: Punktverteilung der direkten Röntgenabbildung in x - Richtung. Goetze-Fokus = 1.2 mm, Fokus-Schirm-Abstand = 1000 mm, Objekt-Schirm-Abstand = 22 mm, Objektdicke = 1.2 mm, Parameter = Achsenabstand a .

Der Fokusschirmabstand ist mit D, der Objektschirmabstand mit Δ bezeichnet. Die Größe a entspricht dem Abstand der Lochblendenöffnung (Objektkante) von der Systemachse. Die Gleichung (28) wurde praktisch über ein Computerprogramm ausgewertet. Näherungsweise lassen sich auch die beiden Einflüsse Objektausdehnung und reine geometrische Unschärfe (mit vernachlässigbarer Objektdicke) separieren und explizit berechnen.
In Abb. 7 sind entsprechende Punktbilder für D = 1000 mm, Δ = 22 mm, d = 1.2 mm und verschiedene Achsabstände a wiedergegeben. Während die dargestellten Punktbildverteilungen p(y) für Objekte vernachlässigbarer Dicke nur eine geringe Variation über das Bildfeld aufweisen, p(x) ist völlig koordinatenunabhängig identisch p(y) für a=o, ergibt sich aus dem Vergleich der Abb. 7 mit Abb. 6 eine starke Abhängigkeit des Punktbildes p(x,y) vom Abstand a zur Achse. Abb. 7 ist für Ringe der Dicke 1.2 mm und einen Röhrenfokus der konstanten Ausdehnung 1.2 mm errechnet.
Der Abstand a bestimmt sich aus dem Abstand derjenigen Ebene zur optischen Achse, welche die interessierende Ringberandung enthält bzw. tangiert.
Für den Fall eines Landoltringschlitzes in x-Richtung ist die entsprechende Flächennormale die Ordinatenachse und damit a = y . Die zusätzliche Variation durch den Goetzefokus, dessen effektive Ausdehnung in y-Richtung für die Ordinaten werte -65, o, 65 mm bzw. o.97, 1.20 und 1.41 beträgt, wirkt sich vorallem bei den breiteren Punktbilder nur geringfügig aus.
Als wesentliches Ergebnis ist die starke Beeinflussung der Punktbildverteilung p(x,y) durch die Dicke des Objekts und die Koordinaten des abzubildenden Objekts anzusehen. Wie oben schon erwähnt, liegen die abzubildenden Ringe sämtlich im Dickenintervall (0 .... 1.2 mm). Bei einem abzubildenden Objektbereich von 130 x 180 mm^2 ist mit einem Fokusschirmabstand von 1000 mm der Bildwinkelbereich bereits soweit eingeschränkt, daß eine Bildgütevariation über das abzubildende Feld im interessierenden Ortsfrequenzbereich vermieden werden kann. Da bei der vorliegenden Aufgabe vornehmlich die Abbildungsschärfe der Landoltringkanten zu beachten ist, werden die Modulationsübertragungsfunktionen aus den p(x) und p(y) entsprechenden Spaltbildern s(x) und s(y) errechnet.

Abb. 8: Modulations-Übertragungsfunktion der direkten Röntgenabbildung. Goetze-Fokus= 1.2 mm, Fokus-Schirm-Abstand = 1000 mm, Objekt-Schirm-Abstand = 22 mm. Objektdicke = 1.2 mm (durchgezogene Kurve), 0 mm (gestrichelte Kurve). Parameter = Achsenabstand a .

In Abb. 8 sind Modulations-Übertragungsfunktionen der direkten Röntgenabbildung für die Parameter dieser Arbeit wiedergegeben. Sie wurden über ein Computer-Programm aus den Spaltbildern für die beiden Extreme, die Dicke 0 und 1.2 mm und verschiedene Parameter a errechnet. Die Kurve mit a = 0 gilt für Ringdicke 0 und 1.2 mm auf der Achse und für Ringdicke 0 in Achsenentfernung unabhängig vom Ordinatenwert. Die beiden unterbrochenen Kurven zeigen die Wirkung des Goetzefokus in Ordinatenentfernung für Ringdicke 0 und die bei den extremen Ordinatenwerte -65 mm und +65 mm, unabhängig vom Abszissenwert des Bezugspunktes. Dagegen gelten die Kurven mit a=25 bis 125 mm für die entsprechenden MÜF in Normalenentfernung zur interessierenden Berandungsfläche, mit a als Abstand der Flächennormalen vom Koordinatenursprung (opt. Achse). Mit der Darstellung in Abb. 8 ist der Variationsbereich der Übertragungsfunktionen über die Bildebene durch Extremfälle abgesteckt. Im folgenden wird sich zeigen, daß die isoplanatische Abbildung dennoch gewahrt ist, da der Übertragungsbereich durch die Leuchtschirme etc. bereits in einem Bereich abgetastet, in dem Abb. 8 noch eine geringe Variation aufweist.

Über das Punktbild $p_s(r)$ der Streustrahlung folgt aus der Morganschen Formel, Gl. (26): Durch die Streustrahlen werden alle Ortsfrequenzen $\nu > 0$ gleichmäßig gedämpft. Da Gleichung (26) keinerlei abbildende Wirkung im engeren Sinne beschreibt, verschwindet die optische Übertragungsfunktion der Streustrahlung $M_s(\nu)$ für alle $\nu > 0$. Die postulierte Existenz eines Punktbildes $p_s(r)$ setzt nach Gl. (23) auch ein nichtverschwindendes Integral über $p_s(r)$ voraus und damit auch ein nichtverschwindendes Integral über $M_s(\nu)$. Setzt man als MÜF des Streukörpers nach der Morganschen Formel eine δ-Funktion an, so erfüllt diese die beiden Forderungen nach einem nichtverschwindenden Integral über $M_s(\nu)$, und nach gleichmäßiger Unterdrückung aller Ortsfrequenzen außer $\nu = 0$, die ja dem Intensitätsmittelwert prop. I_s entspricht.
Als Punktbild des Streukörpers ergibt sich mit $M_s(\nu) = \delta(\nu)$ innerhalb eines endlichen Bereiches

$$p_s(r) = k_0 . \tag{29}$$

Die Konstante k_0 berechnet sich entsprechend Gl. (23) bei Integration über einen sinnvollen endlichen Bereich, der physikalisch durch die Ausdehnung des Leuchtschirms etc. gegeben ist. Die von SPIEGLER angeführten Beobachtungen über die abbildende Wirkung der Streustrahlung unter gewissen Bedingungen, ließ eine eingehendere Untersuchung des Punktbildes $p_s(r)$ sinnvoll erscheinen. Deshalb wurde in der bereits erwähnten Arbeit (GALL) unter den Bedingungen von Seite 19 das Punktbild des Streukörpers ohne Raster untersucht. Meßtechnisch ist das Spaltbild des Streukörpers besser zu bestimmen. Im allgemeinen besteht eine eindeutige Beziehung Punktbild - Spaltbild, d.h., sie sind wechselseitig eindeutig ineinander umrechenbar. Als Punktbild des Streukörpers $p_s(r)$ wurde eine Exponentialfunktion angesetzt

$$p_s(r) = p_s(r=0) \cdot \exp(-\alpha \cdot r/\Delta) \tag{30}$$

und gute Übereinstimmung zwischen dem damit errechneten Spaltbild $s_s(r)$ und der experimentell ermittelten Funktion $s_x(x)$ innerhalb des Messbereiches

von 5° bis 55° gefunden. Dies wurde bei verschiedenen Röhrenspannungen und verschiedenen Streukörperdicken (5, 10, 15 cm Wasser) bestätigt. Während die Streukörperdicke einen gewissen Einfluß auf den Exponenten α hat, $\alpha = 1.5$ bei 5 cm, $\alpha = 1.65$ bei 10 cm und $\alpha = 1.8$ bei 15 cm, konnte keine signifikante Abhängigkeit von der Röhrenspannung oder vom Abstand Δ zum Streukörper festgestellt werden. Die Gleichung (29) für das Punktbild des Streukörpers nach der Morganschen Formel ist als Sonderfall von Gl. (30) für große Abstände Δ anzusehen. Das Punktbild $p_s(r)$ des Streukörpers wird durch den Raster nicht nur in seinem Absolutbetrag beeinflusst, sondern auch in seiner Gestalt.

Die von einem Punkt ausgehende Strahlung gleicher Intensität $\hat{I}$ in der Empfängerebene wird durch einen Parallelraster (Lamellenhöhe $\hat{h}$, Dicke $\hat{d}$, Distanz $\hat{D}$) abgeschattet. Die mittlere Intensitätsverteilung hinter dem (als bewegt gedachten) Raster senkrecht zur Lamellenrichtung lässt sich bei undurchlässigen Lamellen durch folgende Beziehung beschreiben:

$$I_r(x) = \begin{cases} \hat{I} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{D}+\hat{d}} \cdot \left(1 - \frac{\hat{h}}{\hat{D}} \cdot \frac{x}{\Delta}\right) & \text{für } x < \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \\ 0 & \text{für } x \geq \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \end{cases} . \qquad (31)$$

In Lamellenrichtung errechnet sich die Intensitätsverteilung $I_r(y)$ zu

$$I_r(y) = \hat{I} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{D}+\hat{d}} . \qquad (32)$$

Allgemein ergibt sich für einen Aufpunkt A(x, y) als Intensität hinter dem Raster

$$I_r(x,y) = \begin{cases} \hat{I} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{D}+\hat{d}} \cdot \left(1 - \frac{\hat{h} \cdot x}{\hat{D} \cdot \Delta}\right) & \text{für } x < \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \\ 0 & \text{für } x \geq \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \end{cases} . \qquad (33)$$

Aus den Gleichungen (30) und (33) ergibt sich für die Punktbildverteilung des Streukörpers mit Raster

$$p_s'(x,y) = \begin{cases} p_s'(0,0) \cdot \exp(-\alpha \cdot r/\Delta) \cdot \left(1 - \frac{\hat{h} \cdot x}{\hat{D} \cdot \Delta}\right) & \text{für } x < \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \\ 0 & \text{für } x \geq \Delta \cdot \hat{D}/\hat{h} \end{cases} . \qquad (34)$$

mit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ und $p_s'(0) = p_s(0) \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{D}+\hat{d}}$.

Das rotationssymmetrische Punktbild $p_s(r)$ des Streukörpers nach Gl. (30) wird durch das lineare Raster in ein elliptisches Punktbild $p_s'(x,y)$ nach Gleichung (34) umgeformt.

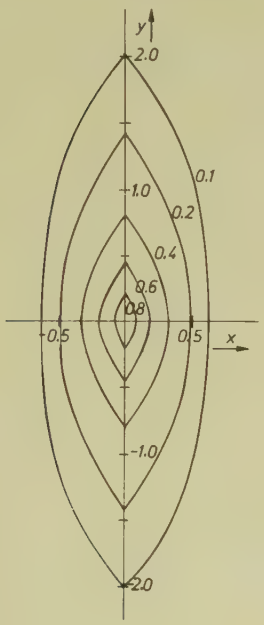


Abb. 9: Punktbild des verwendeten Streukörpers mit Raster in Höhenliniendarstellung unter Annahme strahlenundurchlässiger Rasterlamellen.

Unter den Bedingungen der Aufnahmeapparatur ergibt sich als Punktbild des Streukörpers bei Annahme völlig undurchlässiger Rasterlamellen

$$p_s'(x,y) = \begin{cases} p_s'(0,0) \cdot \exp(-0{,}8 \cdot r) \cdot (1 - 1.6x) & x < 0.63 \\ 0 & x \geq 0.63 \end{cases} \quad \text{für} \qquad (35)$$

Die Werte für Lamellenhöhe $\hat{h}$, -Dicke $\hat{d}$ und -Distanz $\hat{D}$ waren nicht explizit bekannt, sondern wurden aus den gegebenen Daten von Schachtverhältnis, Lamellenzahl pro cm und der gemessenen Primärtransmission T_p gefolgert. In Abb. 9 ist die Punktbildverteilung nach Gl. (35) in Form einer Höhenliniendarstellung wiedergegeben. Bei einer Lamellendicke von 50μ ist die Durchlässigkeit der Lamellen für die schräg auftreffenden Streustrahlen quantitativ bereits bedeutsam, dies geht aus dem Vergleich von Meßdaten

der Streustrahlentransmission von verschiedenen Rastern und Computerberechnungen (Ansatz: undurchlässige Lamellen) hervor.

Da sich das Punktbild des gesamten Röntgenstrahlengangs als Summe des Punktbildes $p_p(x,y)$ und des Punktbildes $p'_s(x,y)$ bzw. bei Rotationssymmetrie als Summe $p_p(r) + p'_s(r)$ darstellt, lässt sich auch die MÜF M(v) eines Gesamtstrahlengangs der Röntgenabbildung angeben:

$$M(v) = c \cdot M_p(v) + (1-c) \cdot M_s(v) \,. \tag{36}$$

Die Einzelübertragungsfunktionen $M_p(v)$ und $M_s(v)$ sind beide Tiefpaßfunktionen, wobei die Übertragungsfunktion der Streustrahlenabbildung $M_s(v)$ bereits bei geringen Ortsfrequenzen gegen Null geht, während die Übertragungsfunktion des direkten Strahlengangs $M_p(v)$ erst bei relativ hohen Ortsfrequenzen verschwindet. In einem mittleren Frequenzintervall um $\bar{v}$ gilt:

$$\begin{aligned} M_s(\bar{v}) &\approx 0 \,, \\ M_p(\bar{v}) &\approx 1 \,. \end{aligned} \tag{37}$$

Im Bereich des Plateaus ergibt sich für c die Beziehung:

$$c = K_{ps'} / K_p \,.$$

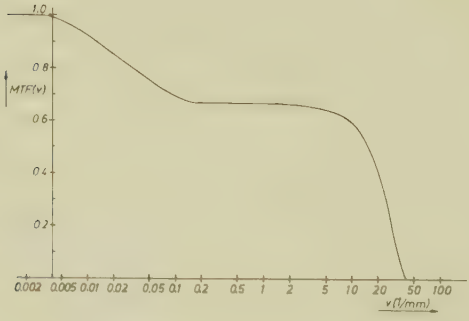


Abb. 10: Modulationsübertragungsfunktion des Gesamtstrahlengangs der Röntgenabbildung bei mittleren axialen Punktbildern.

Mit dem entsprechenden Wert von Seite2owird c = 0.66 und Gl. (36) ergibt sich als

$$M(\nu) = 0.66 \cdot M_p(\nu) + 0.34 \cdot M_s(\nu) . \qquad (38)$$

Diese Funktion ist für Objekt- und Bildbereich um die optische Achse in Abb. 10 dargestellt.

In Anbetracht des niedrigen Frequenzbereichs, in dem die Streustrahlen-MÜF anteilmäßig wirksam wird, im Vergleich zu den Signal-Spektren, wird bei der Darstellung des Gesamtstrahlengangs im weiteren auf die Darstellung des unteren Tiefpasses verzichtet.

II. 4. Leuchtschirme

Im Gesamtübertragungssystem sind Leuchtschirme und Filme austauschbar, während die übrigen Parameter konstant gehalten werden. Die Leuchtschicht, eine Zinksulfid-Cadmiumsulfid-Mischung, ist auf weißen Karton aufgebracht. Die drei verwendeten Leuchtschirme, bezeichnet mit H, N,S, unterscheiden sich u.a. durch die aufgebrachte Schichtdicke und damit durch die Empfindlichkeit. In der folgenden Tabelle sind Schichtdicke, mit Mikrometer bestimmt,und relative Empfindlichkeit der Schirme angegeben. Als Schirmempfindlichkeit wird die Schirmleuchtdichte B bei konstanter Röntgenintensität I mit einem SEV gemessen.

Schirm:	H	N	S
Schichtdicke (mm):	0.50	0.26	0.19
rel. Empfindlichkeit:	1.00	0.61	0.42

Die Leuchtschirme sind weitgehend linear, d.h. bis zu hohen Röntgenintensitäten besteht zwische der Röntgenintensität I und der Schirmleuchtdichte B die Beziehung:

$$B = const. \cdot I . \qquad (39)$$

Die unterschiedliche Dicke der einzelnen Schirme bedingt auch verschiedene Zerstreuungsfiguren bzw. Punktbilder: Es ist zu erwarten, daß die Halbwertsbreite der Punktbilder mit der Schichtdicke zunimmt. Zur genauen Bestimmung der Schirm-Punktbilder wurden experimentell die einzelnen Modulationsübertragungsfunktionen der Schirme bestimmt:
In Abb. 11 ist die Anordnung zur Bestimmung der Kontrastfunktion (rechteckige Eingangsmodulation) schematisch dargestellt. Nach der Altar-Formel lässt sich aus der Kontrastfunktion K(v) die entsprechende MÜF M(v) errechnen. Die Röntgenröhre wird unter denselben Bedingungen betrieben wie bei den Phantomaufnahmen (110 kV mit Vorfilter).

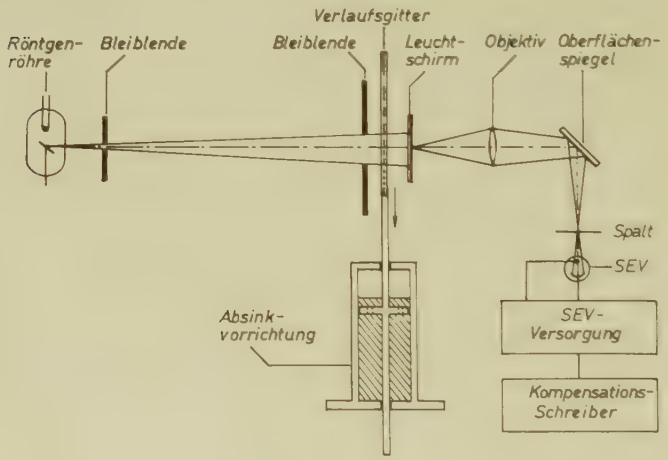


Abb. 11: Anordnung zur Bestimmung der Leuchtschirm - MÜF.
1 Röntgenröhre, 2 Bleiblenden, 3 Verlaufsgitter, 4 Absinkvorrichtungen, 5 Leuchtschirm, 6 Objektiv, 7 Oberflächenspiegel, 8 Spalt, 9 SEV, 10 SEV - Versorgung, 11 Kompensationsschreiber.

Das von der Röhre ausgehende Strahlenbündel wird durch Blenden begrenzt und durch ein Bleigitter verlaufender Linienfrequenz (0.05;0.5 ..... 10; 10 .... 0.5;0.05 1/mm) moduliert. Das Gitter wird mittels einer hydraulischen Absinkvorrichtung langsam und gleichmäßig senkrecht zur

Linienrichtung bewegt. Der Leuchtschirm setzt das Strahlenbild in eine für den Schirm spezifische Leuchtdichteverteilung um. Ein enger spaltförmiger Bereich des Schirms wird durch das Objektiv (Agfa-Solinar, Bl. 5.6) erfasst, der Lichtstrom auf eine SEV-Röhre über einen Oberflächenspiegel geleitet und von einem Kompensationsschreiber registriert. Spalt und Linienrichtung des Bleigitters sind parallel ausgerichtet. Der Oberflächenspiegel gewährleistet durch die Umlenkung des Strahlengangs eine Abschirmung des SEV gegen direkte Röntgenstrahlung.

Die Eingangsmodulation am Schirm ist konstant, da Röhrenstrom und Dicke der Bleistege konstant sind. Die Leuchtdichtemodulation (Ausgangsmodulation) des Schirms zeigt eine der Linienfrequenz v gegenläufige Charakteristik: mit steigender Linienfrequenz v nimmt die Ausgangsmodulation ab.

Die Apparatefunktion der Anordnung wurde lichtoptisch bestimmt: Eine transparente Kontaktkopie des Bleigitters wurde in der Schirmebene abwärts bewegt und modulierte den von einer gleichmäßig ausgeleuchteten Opalglasscheibe mit Grünfilter ausgehenden Lichtstrom. Damit sind die Einflüsse des lichtoptischen Systems und des elektronischen Systems erfasst. Zusammen mit dem Anteil der unscharfen Gitterabbildung durch direkte Röntgenstrahlen erhält man damit die Apparatefunktion.

Die Leuchtdichtemodulation der verschiedenen Schirme wird normiert auf den Wert der Kontrastfunktion bei v = 0.05 (1/mm), der kleinsten Linienfrequenz: R(v=0.05) = 1.00 . Dies findet seine Rechtfertigung an Ergebnissen von Göttel, wonach die Rechteckfunktionen R(v) entsprechender Leuchtschirme bereits bei v = 0.15 (1/mm) den assymptotischen Wert, auf 1.00 normiert, erreichen.

Die Rechteckfunktionen R(v) lassen sich nach der Altar-Formel

$$M(v) = \frac{\pi}{4}\left[R(v) + \frac{1}{3}R(3v) - \frac{1}{5}R(5v) + \frac{1}{7}R(7v) + \frac{1}{11}R(11v) - \frac{1}{13}R(13v) \ldots\right]$$

in Modulationsübertragungsfunktionen M(v) umrechnen. Die Voraussetzung zur Anwendung der Altar-Formel, das Fehlen eines Phasenanteils, ist bei den Leuchtschirmen in axialer Abbildung erfüllt, das Punktbild ist rotationssymmetrisch.

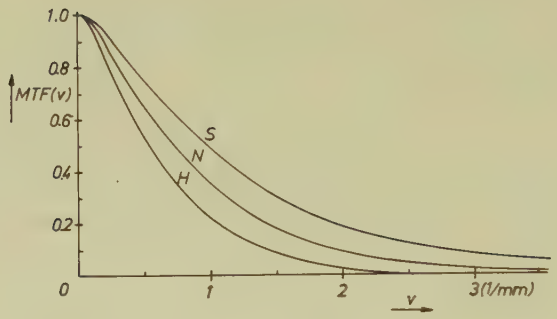


Abb. 12: Gemessene Modulationsübertragungsfunktionen der 3 verwendeten Leuchtschirme.

Die Reihe der Altar-Formel wird dann abgebrochen, wenn das letzte Glied einen Wert kleiner 0.001 erreicht. Die so errechneten Modulationsüber-übertragungsfunktionen werden noch über die Apparatefunktion korrigiert:

$$M(v)_{real.} = M(v)_{gem.} / M(v)_{App.}$$

und sind in Abb. 12 für die 3 verschiedenen Schirme dargestellt. In Abb. 13 ist der Verlauf der über ein Computer-Programm daraus errechneten Punktbilder zu ersehen.

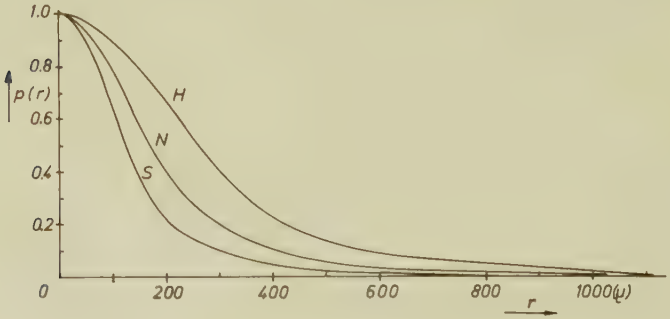


Abb. 13: Punktbildverteilung der verwendeten Leuchtschirme

Bei den Messungen zur Bestimmung der Kontrastfunktion R(v) wurde ein interessanter Nebeneffekt sichtbar:

Wurde der Leuchtschirm zu einem Zeitpunkt t_o der konstanten Röntgenintensität ausgesetzt, so stieg die registrierte Leuchtdichte des Schirms nicht schlagartig auf den der Gl. (39) entsprechenden Wert an, sondern stellte sich assymptotisch darauf ein. Die Zeitkonstante τ dieses Anstiegs erwies sich als sehr abhängig von der Vorgeschichte des Schirms, d.h. von der Vorbelichtung und der Dunkelpause. In der Darstellung $\log(B_{ass.} - B(t-t_0)) = F(t-t_o)$ zeigt sich eine zusammengesetzte Funktion aus einem anfänglichen sehr schnellen Abfall und einem nachfolgenden langsamen linearen Abfall der Zeitkonstante τ. Bei konstanter Dunkelpause nimmt τ mit zunehmender Vorbelichtung ab, während bei konstanter Vorbelichtung τ mit zunehmender Dunkelpause zunimmt. Größenordnungen für τ der gemessenen Schirme sind 1... 12 (sec), wobei ein Vergleich mit Größenordnungen der Nachleuchtdauer sofort den Unterschied der beiden Effekte deutlich macht. Der Effekt scheint mit der Dotierung von Zusatzstoffen der Leuchtschicht (Ag etc.) zusammenzuhängen, wobei die Zeitkonstanten des Aufbaueffekts mit Übergängen zweiter Art in Verbindung stehen könnten. Eine genauere weitere Untersuchung wurde in Ermangelung apparativer Möglichkeiten zur Messung im IR-Gebiet unterlassen.

Als praktische Folgerung für die Messungen an Folien und Schirmen ließe sich die von mehreren Autoren geschilderte Ungenauigkeit bei der Bestimmung von MÜFs deuten: Messungen an Schirmen nach gewisser Dunkelpause können ganz andere Bildmodulationen ergeben als durchgehend verlaufende Messungen. Bei einer systematischen Folge der verschiedenen Linienfrequenzen ließe sich damit die angegebene Ungenauigkeit der Modulation für $v \to 0$ deuten, je nachdem dieser Wert am Anfang oder am Ende der Serie bestimmt wird.

II. 5. Schirmbildfilme und photographische Entwicklung

Als Schirmbildfilme standen 5 verschiedene Fabrikate zur Verfügung. Sie seien mit den Ziffern 1 bis 5 bezeichnet. Die rel. Empfindlichkeit der verschiedenen Filme wurde wie folgt abgeschätzt: Probestreifen der 5 Fabrikate wurde eine Intensitätstreppe aufbelichtet und eine gemeinsame Entwicklung unter den üblichen Bedingungen vorgenommen. Aus den Schwärzungskurven wurden die einer Schwärzung 1.0 über Schleier entsprechende rel. Intensität bestimmt. Damit erhält man ein praxisnahes Maß in Anlehnung an die in dieser Untersuchung gewählte mittlere Schwärzung der Filme und die Empfindlichkeitszahl der Röntgen-Folienfilme. Der Empfindlichkeitszahl der bildmäßigen Photographie liegt die Bezugsschwärzung 0.1 über Schleier zugrunde. Ein wesentlicher Unterschied zur bildmäßigen Photographie besteht auch noch darin, daß dort die Empfindlichkeit mit einer Lichtquelle breiter spektraler Verteilung bestimmt wird, während bei den hier verwendeten Schirmbildfilmen nur die spektrale Empfindlichkeit im Emissionsbereich der Leuchtschirme maßgebend ist. In der folgenden Tabelle sind die für S = 1.0 über Schleier erhaltene rel. Intensitäten linear und logarithmisch angegeben. Dabei ist der empfindlichste Film (Nr. 1) mit der Intensität 1.0 belegt. Zur groben Abschätzung wurde dieses Verfahren auch auf einen Streifen Agepe - Film angewandt.

Film Nr. :	1	2	3	4	5	Agepe
rel. Int. :	1.00	1.18	1.48	1.28	2.85	6.3
$^{10}\log$ I :	0.00	0.07	0.17	0.11	0.45	0.8

Die in Abb. 14 dargestellten Schwärzungskurven der 5 Schirmbildfilme wurden aus Stufenkeilaufnahmen bestimmt. Die Stufenkeile aus Aluminium und Kupfer waren über die Abstandvariation bzgl. der wirksamen Intensität eingeeicht worden. Neben den oben angegebenen rel. Empfindlichkeiten, die bei der Darstellung der Kurven mit einbezogen wurden, kann man aus den Schwärzungskurven die Gradation im linearen Teil der Kurve entnehmen.

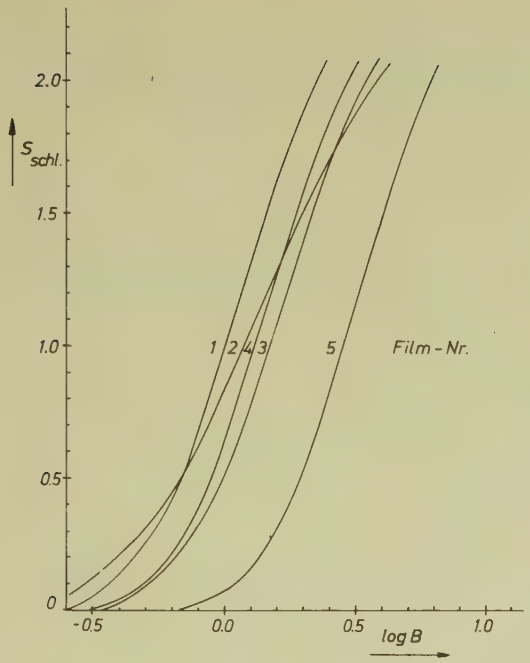


Abb. 14:
Schwärzungskurven der verwendeten Schirm - bildfilme

Als Mittelwert der örtlichen Gradation γ bei der Schwärzung 1.0 über Schleier ergab sich aus den verschiedenen Aufnahmen, die zur Konstanz jeder Phantom-Aufnahmeserie angeschlossen wurden:

Film Nummer	1	2	3	4	5
$\gamma = \Delta S / {}^{10}\log B/B_o$:	3.2	2.25	3.1	3.2	3.35
mittl. Abw. $\pm \Delta\gamma$:	0.1	0.08	0.1	0.05	0.1

Im linearen Teil der Schwärzungskurve S = S(logB) lässt sich der einem Belichtungsunterschied B/B_o entsprechende Schwärzungsunterschied ΔS angeben als

$$\Delta S = \gamma \cdot {}^{10}\log B/B_o \; . \qquad (40)$$

Durch die hohe Vorfilterung ist die Homogenität der Röntgenstrahlung gegenüber Al-Objekten gewährleistet und mit Gl. (15) und Gl. (39), die die

Linearität der Schirme kennzeichnet, ergibt sich für den Leuchtdichteunterschied eines abgebildeten Objekts der Dicke d mit $\Delta\mu$ gegenüber der Umgebung

$$^{10}\log B/B_0 = -\Delta\mu \cdot d \cdot {}^{10}\log e \,. \tag{41}$$

In Gl.(40) eingesetzt folgt für den entsprechenden Schwärzungsunterschied ΔS im linearen Teil der Schwärzungskurve

$$\Delta S = -\gamma \cdot \Delta\mu \cdot d \cdot {}^{10}\log e \,. \tag{42}$$

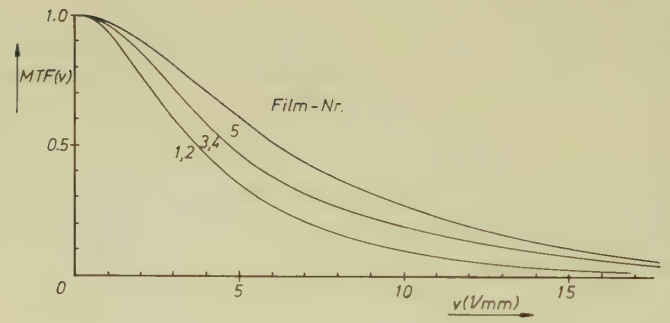


Abb. 15: Modulationsübertragungsfunktionen der verwendeten Schirmbildfilme. Ortsfrequenzen bezogen auf die Schirmebene.

Die Modulationsübertragungsfunktionen der verwendeten Schirmbildfilme wurden Mitteilungen der Hersteller entnommen. Sie sind in Abb. 15 dargestellt. Etwaige Abweichungen im Bereich höherer Ortsfrequenzen von den angegebenen Kurven fallen bei dieser Untersuchung nicht ins Gewicht, da sich die einzelnen Funktionen im interessierenden Frequenzbereich nur wenig unterscheiden.

Die MÜF der Filme sind als Eingangsmodulationen m(v) zu verstehen, deren reziproke Werte 1/m(v) als Eingangsmodulation für sämtliche Linienfrequenzen gleiche Tiefe der Schwärzungsmodulation ergeben.

Belichtung der Aufnahmen und photographische Entwicklung

Bei 110 kV wurde der Generator im Durchleuchtungsbetrieb bei einem konstanten Röhrenstrom von 4 mA gefahren. Die Belichtungszeit wurde so ausgelegt, daß die mittlere Transparenz sämtlicher Dias die gleiche ist, da ja alle Dias bei der Testprojektion dieselbe mittlere Leuchtdichte ergeben sollen. Bei einer mittleren Schwärzung von 1.0 über Schleier wurde die Gesamtschwärzung der Dias auf 1.2 eingestellt. Nach einigen Autoren ist in diesem Bereich die Erkennbarkeit bei Schwellmessungen optimal. Zur photographischen Entwicklung stand eine Bürsten-Entwicklungsdose zur Verfügung. Die Serienlänge von 8 Aufnahmen ist dadurch festgelegt. Jeder Serie wurde zur Überwachung der Gradation ein Al- und Cu-Stufenkeil mitaufbelichtet. Die für die gewünschte Schwärzung notwendige Belichtungsgröße $I \cdot t^p$ ist aus den Stufenkeilaufnahmen und den Schwärzungskurven nicht ohne weiteres errechenbar, da bei den Phantomaufnahmen die Intensität I am Schirm erheblich niedriger ist als bei den Stufenkeilaufnahmen, wodurch sich wiederum der Schwarzschildexponent p(t) stark ändert. Die erforderliche Schwärzung wurde daher in aufeinanderfolgenden Serien angenähert, die Transparenz bzw. Schwärzung jeweils am Mikrophotometer gemessen. Die als Testserie ausgewählten Dias liegen in ihrer Gesamtschwärzung in einem engen Intervall um den Wert 1.2 .

Die Entwicklungsdose zur Vermeidung des Nachbareffekts stand von einer Arbeit von BIERLING zur Verfügung. Das Oberteil der Dose trägt einen Plexiglaszylinder, der von einem Motor mit starkem Untersetzungsgetriebe bewegt wird. In der Dose selbst sind diametral versetzt 4 Fehhaarbürsten angebracht, die den Zylindermantel mit dem aufgebrachten zu entwickelnden Film bestreichen.

In der Dunkelkammer wird der Filmstreifen mit einer entsprechenden Lehre auf die Länge des Trommelumfangs abgeschnitten und mit Tesaband am

Zylindermantel befestigt. Die Bürsten werden ebenfalls mit einer Lehre im optimalen Anstellwinkel zur Trommel eingesetzt.
Die Entwicklerflüssigkeit (Perutz Röntgenentwickler) wird vor der Entwicklungsserie auf 20°C thermostatisiert. Die Entwicklungsdose befindet sich ebenfalls in dem auf dieser Temperatur gehaltenen Wasserbad. Die gleichmäßig rotierende Trommel wird nun in die Dose mit dem Entwickler eingesetzt und die Entwicklungszeit von 5.0 Minuten mit Stoppuhr überwacht. Nach einer Zwischenwässerung (etwa 0.5 min) wird 10 Minuten lang in einer Jobo-Dose fixiert, anschließend 30 Minuten gewässert, zuletzt mit Antistatic-Netzmittel behandelt. Da die Entwicklungsdose 1.5 l Flüssigkeit fasst, wurden jeweils 2 Streifen mit 8 Aufnahmen in dieser Menge entwickelt. In Vorversuchen war die Aktivität einer bestimmten Menge des verwendeten Entwicklers in Abhängigkeit von der entwickelten Filmmenge bestimmt worden: Die Filmstreifen waren mit identischen Stufenkeilen belichtet, deren Schwärzung und Gradation als direktes Maß für die jeweilige Entwickleraktivität verwendet wurde. Danach ist die Aktivität des Entwicklers bei 2 Streifen konstant. Die Aktivitätsspitze des ganz frischen Entwicklers wurde jeweils durch Zusatz einer gewissen Menge gebrauchten Entwicklers an die neu angesetzten 9-Literflaschen und gewisse Lagerung genommen.

Der photographische Nachbareffekt

Beim Entwicklungsvorgang erfolgt neben der Diffusion Entwicklerflüssigkeit - phot.Schicht auch eine Querdiffusion innerhalb der Schicht, vorallem bei starken Belichtungskanten. Wird durch die Entwicklungsmethode nicht ständig die Diffusion von frischem Entwickler in die Emulsion gefördert, dann bilden sich die bekannten Kontrastüberhöhungen. Durch die Bürstenentwicklung wird die nötige Diffusion erreicht.
In der Arbeit von L.O. INGELSTAMM über die MÜF photographischer Emulsion mit Nachbareffekt ist die nichtlineare Komponente durch den Nachbareffekt sichtbar: Die MÜF von Emulsionen mit Nachbareffekt weisen ein Überschwingen gegenüber den MÜF ohne diesen Effekt auf. Dieses Überschwingen wird mit steigendem Objektkontrast immer stärker und in gleichem Maße verschiebt

sich das Maximum zu höheren Linienfrequenzen. Durch den Nachbareffekt wird also die MÜF einer phot. Emulsion vom Objektkontrast abhängig. Damit würde ein Vergleich der Detailerkennbarkeit mit entsprechenden MÜF sehr kompliziert.

Die Bürstenentwicklung mit der von BIERLING bereitstehenden Dose wurde aus diesem Grunde für die Entwicklung der Phantomaufnahmen verwendet, obwohl diese Methode gegenüber konventionellen Verfahren eine zusätzliche Schwierigkeit bringt: Durch die Vertikalstellung der Bürsten im Entwicklerbad drückt der obere Teil nach unten, so daß bei gleichmäßiger Borstenlänge eine gewisse Streifigkeit im oberen Filmbereich entstehen kann. Da solche Strukturen gerade bei Objekten im Schwellenbereich äußerst stören können, mussten die Testaufnahmen sorgfältig ausgewählt werden. Eine veränderte Bauweise der Dose, auf den gesamten Bürstenbereich wirken gleiche Kräfte, ließe gleichmäßigere Entwicklung erwarten. Bei den vorliegenden Objekten sind die Kontraste meist gering, der Bereich der Ortsfrequenzen niedrig. In diesem Fall ist nach der Arbeit von HENDEBERG der Einfluß des Nachbareffekts gering gegenüber hochkontrastigen Objekten, deren Spektralfunktionen zu höheren Ortsfrequenzen hin reichen. Für den Frequenzbereich, der in dieser Arbeit interessiert, wurde der Einfluß der Entwicklungsmethode auf die MÜF in einem Vorversuch getestet: Identische Kontaktaufnahmen eines verlaufenden Liniengitters bis 10(1/mm) auf Film Nr. 1 wurden einmal mit der Bürstenentwicklungsdose (a), zum anderen mit konventionellen Verfahren (b) (Jobo-Dose, Schalenentwicklung etc.) entwickelt. Aus den registrierten Photometerkurven und der Gradation des Films lassen sich entsprechende Kontrastfunktionen R(v) errechnen. Bildet man den Quotienten $R_b(v)/R_a(v)$, so zeigt die entsprechende Kurve ein Überschwingen erst bei 4(1/mm) mit einem Anstieg auf 1.08 bei v=10(1/mm).

Bei den Phantomaufnahmen wurde für eine Schirm-Film-Kombination eine entsprechende Untersuchung mit Entwicklungsmethoden (a) und (b) durchgeführt. Das Ergebnis darf vorweggenommen werden: Bei den kleinsten Ringen zeigte sich eine leichte Verbesserung der Detailerkennbarkeit von Methoden (b) gegenüber (a) als positive Auswirkung des Nachbareffekts, ebenfalls bei größeren Ringen, da bei (a) sich die Bürstenstruktur auswirkt.

Die Schwärzungskurve als nichtlinearer Übergang in der Übertragungskette

Durch Rückrechnung des Schwärzungsverlaufs (etwa einer Gitteraufnahme) über die Schwärzungskurve auf entsprechende Eingangskontraste kann zwar eine formale Linearität des phot. Prozesses erreicht werden, zumal bei Vermeidung des Nachbareffekts, und damit eine unter den speziellen Entwicklungsbedingungen eindeutige Beschreibung durch eine MÜF, im Gesamtprozess bildet der Verlauf der Schwärzungskurve jedoch einen nichtlinearen Übergang:

Bei Beschränkung auf den (in der Darstellung S = S(logB) "linearen" Bereich der Schwärzungskurve mit der Gradation γ bewirkt ein Belichtungsunterschied $\Delta B/B_o$ einen Schwärzungsunterschied ΔS, nach G. (40)

$$\Delta S = \gamma \cdot {}^{10}\log B/B_o \quad ,$$

bzw. mit den Bezeichnungen von I_{a1} für die aufbelichtete Intensität und I_{ao} für die mittlere aufbelichtete Intensität gilt

$$\Delta S = \gamma \cdot {}^{10}\log I_{a1}/I_{ao} \quad . \tag{43}$$

Der mittleren resultierenden Schwärzung S_o steht die der aufbelichteten Intensität I_{a1} entsprechende Schwärzung $S_1 = S_o + \Delta S$ gegenüber. Die Gradation γ ist als positiv angesetzt.
Die Intensität des Projektorlichts wird durch die Bezugsschwärzung S_o auf I_{to} abgeschwächt, während sich die Signalintensität I_{t1} aus der Beziehung

$$I_{t1} = I_{to} \cdot 10^{-\Delta S} \tag{44}$$

ergibt und daraus mit Gl. (43) folgt

$$\begin{aligned} I_{t1} &= I_{to} \cdot 10^{-\gamma \cdot \log(I_{a1}/I_{ao})} \\ &= I_{to} \cdot (I_{a1}/I_{ao})^{-\gamma} \quad . \end{aligned} \tag{45}$$

Die Objekt-Intensitätsverteilung kann durch Einführung eines maximalen Objektkontrasts, ausgedrückt in einer Objekttransparenz T, vereinfacht formuliert werden:

Die Intensität I_a^* innerhalb des Objekts liegt dann im Intervall (0...1) und I_{a1} hat die Form

$$I_{a1} = I_{ao} \cdot (T + (1-T) \cdot I_a^*) . \qquad (46)$$

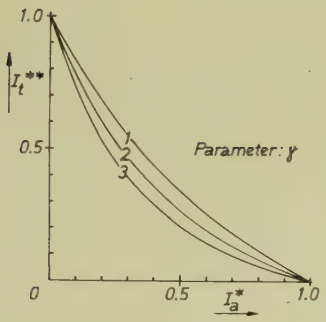
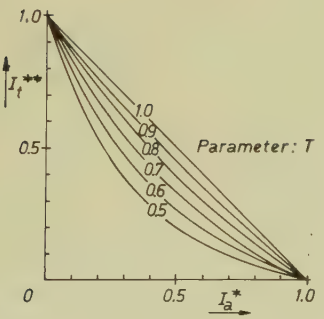


Abb. 16:
Kennlinie zur Transformation der relativen Objektverteilung I_a^* in die relative Bildverteilung I_t^{**}.

a) Objekttransparenz T = 0.5; Parameter : Gradation γ



b) Gradation γ = 3.0, Parameter : Transparenz T .

Setzt man I_{to} identisch 1 , so lautet $I_t^* = I_{t1}$ nach Gl. (46)

$$I_t^* = (T + (1-T) \cdot I_a^*)^{-\gamma} \qquad (47)$$

oder auch $I_t^* = 1 + I_t^{**} \cdot \zeta \quad mit \quad \zeta = T^{-\gamma} - 1 , \qquad (48)$

bzw. $I_t^{**} = \zeta' \cdot (I_t^* - 1) \quad mit \quad \zeta' = 1/(T^{-\gamma} - 1) .$

Bei voller Modulation, entsprechend $I_a^* = 0$ bzw. 1 , erfährt das Signal über die Kennlinie eine "Verstärkung" V , die für den linearen Bereich der Kennlinie nach

$$V = \frac{T^{-\gamma} - 1}{T^{-1} - 1} \qquad (49)$$

berechnet wird. Nimmt man wie im vorliegenden Fall eine mittlere Schwärzung von 1.0 über Schleier und einen Gradationswert γ um 3.0 an, so sind obige Beziehungen für Transparenzwerte T> 0.5 gültig. In Abb. 16 sind die nach Gl. (48) und (47) errechneten Kennlinien dargestellt. Sie dienen zur graphischen Transformation der rel. Objektverteilung I_a^* in die rel. Bildverteilung I_t^{**} . Die Kennlinien im Diagramm $I_t^{**} = f(I_a^*)$ sind umso mehr gekrümmt, je größer der Gradationswert γ ist und je näher die Transparenz T bei 1.0 liegt. Für T→1 nähert sich die Kurvenschar assymptotisch der Linearität. In diesem Fall ist das Signal gegenüber der mittleren auftreffenden Intensität nur gering und die Verstärkung V ist gleich der Gradation γ. Die in der Darstellung $I_t^{**} = f(I_a^*)$ lineare Kennlinie für T→1 wird als "Idealkurve" im folgenden bezeichnet.

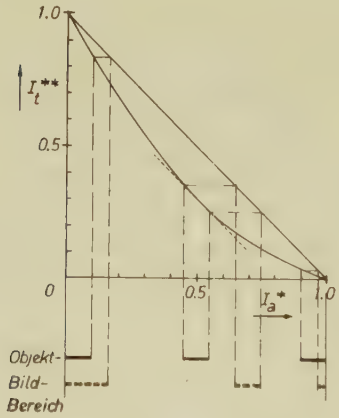


Abb. 17:
Transformation kleiner Intensitätsunterschiede in verschiedenen Bereichen von I_a .

Um den Einfluß der phot. Kennlinie auf die Wiedergabe von Intensitätsverteilungen zu beurteilen, wird eine Intensitätsverteilung $I_a^*(x)$ über die Kennlinie transformiert und über die Idealkurve (für T→1) rücktransformiert.

Dabei zeigt es sich (Abb. 17), daß die Verteilung I(x) in einem Bereich mittlerer auftreffender Intensität, entsprechend hohem I_a^* gestaucht, in einem Bereich sehr geringer auftreffender Intensität, entsprechend geringem I_a^*, gestreckt wird, während sie bei mittlerem I_a^* etwa gleich bleibt.

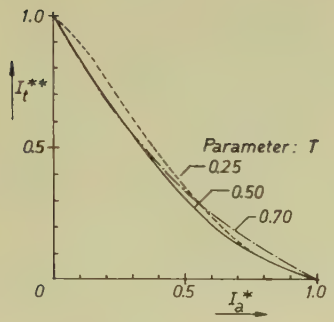


Abb. 18:
Transformation der Objektverteilung I_a^* in die rel. Bildverteilung I_t^{**} für Film Nr. 4 verschiedener Transparenzwerte T .

Die in Abb. 16 wiedergegebenen Kennlinien sind für den linearen Teil der Schwärzungskurve errechnet. Bei einer realen Schwärzungskurve wird dieser Bereich von kleineren Transparenzwerten T, entsprechend größerem Objektumfang, überschritten. Deshalb wurde für die Schwärzungskurve des Films Nr. 4 und mehrere Transparenzwerte T die entsprechende Kurvenschar in Abb. 18 dargestellt.

Der Vergleich mit der Kurvenschar in Abb. 16 zeigt, daß durch das Überschreiten des linearen Bereichs der Schwärzungskurve die Kennlinienschar näher an die Idealkurve heranrückt.

In Abb. 19 ist zur Abschätzung der Signalverzerrung durch die nichtlineare Kennlinie die Transformation zweier Gauß-Verteilungen für den Film Nr. 4 und rel. hohen Objektkontrast T = 0.50 wiedergegeben. Zum Vergleich sei bemerkt: Die kleinsten verwendeten Landoltringe benötigen für 50 % Erkennbarkeit etwa T = 0.55. Die über den ganzen Modulationsbereich ersteckte Gaußverteilung wird etwas verbreitert, (um den Faktor F_b), entsprechend einer größeren Objektausdehnung bei Abbildung über die Idealkurve mit $\gamma = 1$.

Eine Gaußverteilung über die halbe Modulationstiefe, wird im wesentlichen nur in der Höhe verschoben, der rel. Bildverlauf ist praktisch identisch der Objektverteilung.

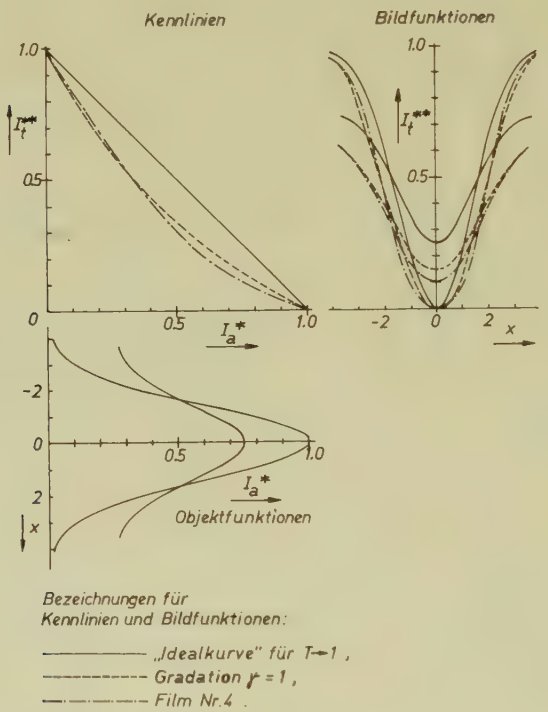


Abb. 19: Abschätzung der Signalverzerrung durch die nichtlineare Kennlinie des phot. Prozesses bei einer mittleren Schwärzung $S_{schl} = 1.0$ und einer mittleren Transparenz T = 0.50 .

Durch Normierung der Transformation mit dem Verstärkungsfaktor V wird entsprechend den vorstehenden Abbildungen die Wirkung des nichtlinearen Prozesses stark verringert.

Bei der Abbildung der Landoltringe sind die großen Ringe scharfkantig und hochkontrastig, während die kleinen Ringe sowohl im Kontrast als auch in der Kantenschärfe abfallen. Bei großer Kantensteilheit und hoher Modulation

(bzgl. V) macht sich die Nichtlinearität kaum bemerkbar und auch bei geringer Kantensteilheit und damit gekoppelt schwacher Modulation ist die Wirkung gering.

II. 6. Projektionssystem, Testapparatur

Zur Durchführung der Erkennbarkeitstests wurde eine Apparatur gebaut: Ein Projektor bildet das zu testende Dia auf Originalformat des Phantoms vergrößert ab. Gleichzeitig wird auf der Projektionsfläche ein gleichmäßiges Umfeld erzeugt, so daß der Übergang Testfeld-Umfeld ohne störenden Sprung in der Leuchtdichte erfolgt. Die Projektion erfolgt im Durchlichtverfahren, der Beobachter befindet sich im Abstand von 40 cm auf der anderen Seite der Bildfläche.

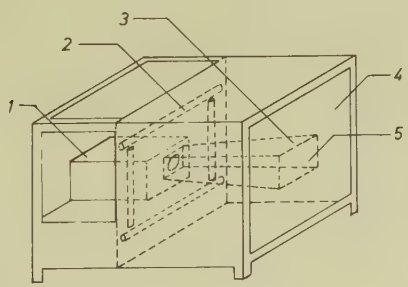


Abb. 20: Testanordnung zur Darbietung der Phantomaufnahmen.
1 Projektor der Testdias
2 Soffittenlampe des Umfelds
3 Trennschacht Infeld / Umfeld
4 Umfeldteil des Projektionsschirms
5 Infeldteil des Projektionsschirms

Der mechanische Aufbau ist aus Abb. 20 zu ersehen. An die senkrechte Mittelwand des Testkastens schließt auf der einen Seite über einen Flansch lichtdicht der Projektor an, auf der anderen Seite ein Tubus, der Infeld

und Umfeld trennt und auf der vorderen Öffnung die Projektionsfläche trägt. Das Umfeld wird von 4 Soffittenlampen, an der Mittelwand befestigt, erzeugt. Sie sind über einen gemeinsamen Vorwiderstand geeignet ans Netz geschaltet, so daß die Umfeldleuchtdichte dem Infeld angeglichen ist. Zur Korrektur der Rotverschiebung in der spektralen Verteilung durch die Lampenunterspannung sind die Soffittenlampen teilweise mit transparenter blauer Folie überklebt. Auf dem weißen Karton, der sich direkt an die Projektionsfläche des Infelds anschließt, erscheint dann ein in Farbe und Leuchtdichte angeglichenes gleichmäßiges Umfeld der Größe 500 x 500 mm^2. Das Projektionsfeld der Größe 130 x 180 mm^2 besteht aus speziellem Material, das unten behandelt wird. Der verwendete Projektor Leitz Pradovit f mit automatischem Diawechsel und Fernfokussierung ist mit einer 500 Watt-Lampe bestückt. Zur Verwendung des sehr gut korrigierten Objektivs Xenotar 2.8/75 mm wurde eine spezielle Objektivführung gefertigt. Die Feldlinse des Kondensors mußte ebenfalls angepasst werden. Die Abblendung des Objektivs auf 4 - 5.6 bringt es mit sich, daß der Lichtstrom des Beleuchtungssystems nicht voll ausgenutzt werden kann.

Bei der Auswahl des geeigneten Materials für die Durchlicht-Projektionsfläche wurden folgende Punkte geprüft:

1) Die Wiedergabequalität. Sie wurde durch Messungen an einem Mikrophotometer geprüft. Ein Liniengitter verlaufender Frequenz vom Kontrast 1 wurde in engen Kontakt zur Materialprobe gebracht. Die Lampe des Mikrophoto - meters projeziert dann in die Probenebene dieselbe Verteilung mit dem Kontrast 1. Durch Spaltabtastung kann der Kontrastverlauf mit zunehmender Linienfrequenz v direkt gemessen werden. Auf jeden Fall bietet dieses einfache Verfahren die Möglichkeit, Relativangaben zu machen.

2) Der Durchlassgrad. Zwei beschränkende Momente sind zu beachten: Dem Beobachter soll eine möglichst hohe Leuchtdichte zur Verfügung stehen und die Irisblende des Objektivs darf nicht zu sehen sein. Im Fall einer sehr feinkörnigen Mattscheibe, die praktisch keinen Kontrastabfall bei 1) zeigte, war die Irisblende zu sehen, außerdem wies dieses Material eine sehr steile Indikatrix auf, was sich für die Tests als sehr abträglich erwies.

3) Materialstruktur. Einfache Materialien wie z.B. dünnes Schreibpapier zeigte eine recht starke innere Struktur, was sich besonders bei den großen Ringen der Klassen (1) und (2) bemerkbar machte: Die Erkennbarkeit sank rapid, bei Bewegung des Materials innerhalb der Bildebene stieg die Erkennbarkeit wieder deutlich an. Bei den kleineren Ringen trat dieser Effekt infolge der höheren Kontraste nicht derart hervor. Gewisse Materialien (transparentes Zeichenpapier, geschliffene Mattscheiben) zeigen als Projektionsflächen eine sehr starke Bildunruhe und eine steile Indikatrix. Beides ist bei Abtastung der Bildfläche nach Details äußerst störend.

Als Material wurde schließlich Alkor-Folie verwendet, eine 0.11 mm starke mattweiße Kunststoffolie. In ihrer Wiedergabequalität liegt sie weit über den übrigen getesteten Materialien. Im allgemeinen nimmt bei gleichem Material mit zunehmender Dicke die Wiedergabequalität ab. Bei sorgfältiger Auswahl des Folienstückes war das Material sehr gleichmäßig. Ein Nachteil ist der geringe Duchlassgrad.

Als Optimum der Proben, leider im Handel nicht erhältlich, hat sich klares Plexiglas mit einer dünnen grauen Schicht (gleichmäßig aufgespritzt) erwiesen. Neben der Abbildungseigenschaft ist auch der Durchlassgrad besser als bei den übrigen Proben.

III. Berechnung der Bildstrukturen für Landoltringe und ähnliche Objekte mittels der Punktbilder und Beziehungen zu den entsprechenden Signalspektren.

Im folgenden sollen unter Bezugnahme auf die errechneten Punktbilder des Gesamtabbildungsstrahlengangs die Bildstrukturen für die Landoltringe errechnet werden. Außerdem werden zum Vergleich die Bildstrukturen für einfache Kreisringe und Kreisscheiben ermittelt.
Die Signalspektren der genannten Objekte werden bekanntlich durch den Frequenzgang des Übertragungssystems verändert. Durch Vergleich der errechneten Bildstrukturen mit den entsprechenden Spektren soll versucht werden, zu einer Aussage über die Anteile der verschiedenen Frequenzbereiche an der Informationsübertragung für den speziellen Fall der Landoltringe zu kommen.

III. 1. Berechnungsformeln für die verschiedenen Objekte

Unter Voraussetzung des Linearitätsprinzips und Beschränkung auf einen Isoplanasiebereich B lässt sich nach Formel (2) aus der Intensitätsverteilung der abzubildenden Objektebene und dem Punktbild des Bereichs B die Intensitätsverteilung in der Bildebene formulieren:

$$b(x_0, y_0) = \iint_B g(x,y) \cdot p(x_0 - x, y_0 - y)\, dx\, dy \,.$$

Eine wesentliche Aussage über die Bildverteilung des Landoltringes erhält man bereits durch Errechnung der Intensitätsverteilung längs des Mittenkreises des Landoltringes (Abb. 21).
Das Punktbild des Durchstoßpunktes optische Achse-Objektebene wird beim verwendeten System als rotationssymmetrisch vorausgesetzt. Innerhalb des gesamten Isoplanasiebereichs B um diesen Punkt ist das Punktbild identisch und entsprechend rotationssymmetrisch.

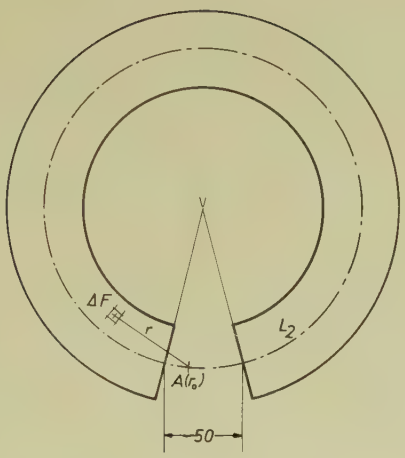


Abb. 21: Zur Bestimmung der Gewichtsfunktionen für einen Sektorenring vom Durchmesser 250 Einheiten.

Beim vorliegenden Problem kann die allgemein formulierte Objektverteilung g(x,y) folgendermaßen vereinfacht werden:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{für } (x,y) \text{ im Landoltringbereich} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} . \qquad (50)$$

Damit lautet Gl. (2)

$$b(x_o', y_o) = 2\pi \int_r g(r; x_o, y_o) \cdot p(r)\, dr . \qquad (51)$$

Aus der Faltungsoperation in Gl. (2) ist damit das Skalarprodukt aus Punktbild p(r) und Gewichtsfunktion $g(r; x_o, y_o)$ geworden. Diese Gewichtsfunktion ist neben dem Argument r auch von den Aufpunktkoordinaten (x_o, y_o), für die die Bildintensität errechnet werden soll, abhängig.

Die Gewichtsfunktion wurde für eine Reihe von Aufpunkten längs des Mittenkreises mit Hilfe eines Computer-Programms an der TR4 ermittelt. Die Verteilung längs eines Radius unterscheidet sich beim Landoltring nur geringfügig

von der eines entsprechenden Kreisringes und kann daher nach dieser unten beschriebenen Berechnung erhalten werden.

Da sich die Objektverteilung $g(x,y)$ des Landoltringes nicht in geschlossener Darstellung formulieren lässt, wurden Gewichtsfunktionen $g_2(r;x_o,y_o)$ für einen in Abb. 21 dargestellten entsprechenden Sektorenring errechnet und die Abweichungen vom Landoltring, die für Aufpunkte im Spaltbereich ins Gewicht fallen, durch Berechnung dieses Nahbereichs in einer Gewichtsfunktion g_1 korrigiert (Abb. 22) .

Die Berechnung der Gewichtsfunktion g_2 geht so vor sich, daß der Bereich des Sektorenringes in Flächenelemente $\Delta F = \Delta R \cdot \Delta\varphi$ aufgeteilt wird und für jedes dieser Elemente ΔF der Abstand r zum jeweiligen Aufpunkt bestimmt wird. Der durch den Ringdurchmesser D festgelegte maximale Abstandsbereich wird in sinnvolle Intervalle unterteilt und das Gewicht $\Delta F(r)$ des Flächenelementes (mit dem Abstand r zum Aufpunkt) zur Maßzahl des entsprechenden Intervalls $g_2^*(r)$, $(r_k \leq r \leq r_{k+1})$ addiert. Auf diese Weise erhält man für beliebige Aufpunkte die Gewichtsfunktion $g^*(r)$. Die Funktion $g(r)$ wird schließlich durch Bezugnahme auf eine Gewichtsfunktion mit genügend großem geschlossenen Bereich normiert:

$$g_2(r) = g_2^*(r) / 2\pi r \Delta r \quad \text{mit} \quad g_2^*(r) = \sum \Delta F(r). \qquad (52)$$

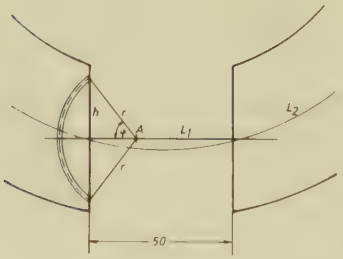


Abb. 22:
Zur Bestimmung der Gewichtsfunktion im Spaltbereich des Landoltringes.

Die Gewichtsfunktion $g_1(r;x_o,y_o)$ für den Spaltbereich des Landoltringes lässt sich geschlossen angeben: Sie errechnet sich als der vom Kreisradius r mit dem Aufpunkt $A(x_o,y_o)$ als Mittelpunkt erfasste Anteil des Landoltringes am gesammten Kreisring (Abb. 22):

$$\begin{aligned} g_1(r) &= \arccos(h/r)/\pi \\ &= \arccos\varphi/\pi \ . \end{aligned} \tag{53}$$

Der Definitionsbereich der Funktion g_1 ist beschränkt durch $h_{max}=b/2$.
Die Aufpunkte zu $g_1(r)$ - auf der Verbindungslinie der Kantenmitten, L_1 - werden auf den Mittenkreis L_2 der Aufpunkte zur Gewichtsfunktion $g_2(r)$ bezogen.
Da die Aufpunkte des Landoltringes sämtlich auf dem Mittenkreis liegen, genügt zu ihrer Kennzeichnung eine Koordinate r_o, die den Bogenabstand einer Spaltkante angibt.
Mit der aus $g_2(r;r_o)$ und $g_1(r;r_o)$ resultierenden Gewichtsfunktion $g(r;r_o)$ folgt dann aus Formel (51) für Aufpunkte mit der Koordinate r_o die Bildintensität $b(r_o)$:

$$b(r_o) = 2\pi \int_r g(r;r_o)\cdot p(r)\,r\,dr \ , \tag{54}$$

bzw.

$$b(r_o) = 2\pi \sum_{\bar r} g(\bar r;r_o)\cdot p(\bar r)\cdot \bar r\cdot \Delta r \ .$$

Diese Bildintensitäten werden zweckmäßig normiert bzgl. der max. Intensität des abbildenden Sytems

$$b(r_o)_{max.} = 2\pi \int_r p(r)\,r\,dr \tag{55}$$

bzw. $$b(r_o)_{max.} = 2\pi \sum_{\bar r} p(\bar r)\cdot \bar r\cdot \Delta r \ .$$

Die normierten Bildintensitäten

$$b'(r_o) = b(r_o)/b(r_o)_{max.} \tag{56}$$

liegen nun sämtlich im Intervall (0...1) .

Im Computer-Programm wurden Gewichtsfunktionen für einen Landoltringdurchmesser von 250 Einheiten berechnet. Die Spaltbreite mit 50 Einheiten erbringt bei angemessenem Rechenaufwand eine ausreichende Genauigkeit der errechneten Gewichtsfunktionen.

Als Aufpunkte $A(r_o)$ - die Werte r_o sind die Bogenabstände zu einer Bezugskante des Landoltringes, gemessen auf dem Mittenkreis - wurden folgende Werte angesetzt: r_o: 25,20, 15, 10, 5, 2, 1, 0.5 , 0,-0.5, -1, -2, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -40, -60, -90, -132, - 289 .

Die Aufpunkte mit positiven Werten r_o liegen im Spaltbereich, der Aufpunkt $A(r_o=0)$ liegt auf der Bezugskante, die negativen r_o-Werte bezeichnen Aufpunkte am Ring selbst. Da die Bildverteilung symmetrisch bzgl. der Mittenparallelen zu den Spaltkanten ist, wurde nur eine Ringhälfte errechnet. Die Aufpunkte $A(r_o=25$ und $A(r_o=-289)$ liegen auf dieser Symmetrielinie. Die Abstände der Aufpunkte sind entsprechend dem zu erwartenden Verlauf der Bildverteilung festgelegt.

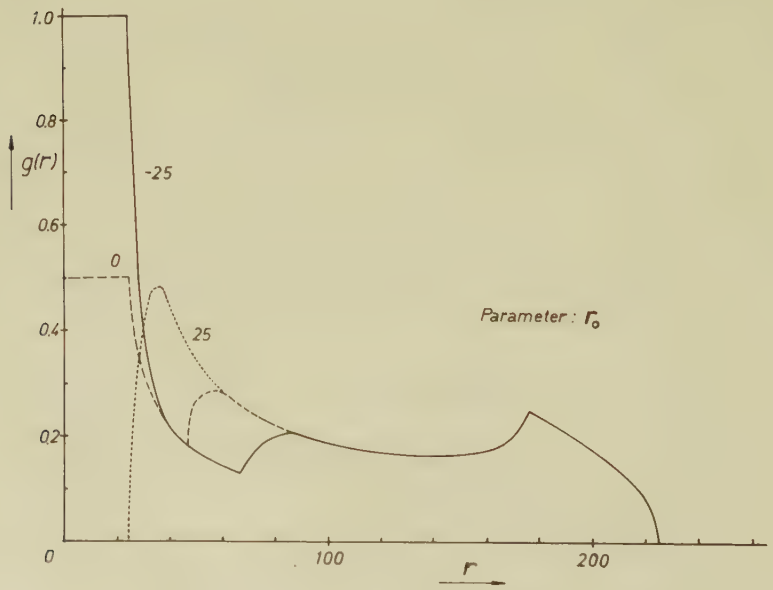


Abb. 23: Gewichtsfunktionen g(r) für Punkte auf dem Mittenkreis des Landoltringes (Durchmesser: 250 Einheiten) im Abstand r_o von der Spaltbegrenzung.

In Abb. 23 sind die Gewichtsfunktionen g(r) für die Aufpunkte $A_1(r_o=25)$, $A_9(r_o=0)$ und $A_{17}(r_o=-25)$ wiedergegeben. Offensichtlich liegt der unterschiedliche Verlauf der Funktionen im Bereich r = 0...100 , während für Abszissenwerte r > 100 praktische Übereinstimmung besteht. Nach Gl.(54) lässt sich daraus folgern, daß der Quotient

$$2\pi \cdot \int_{r=100}^{150} g(r; r_o) \cdot p(r) \cdot r\,dr \;/\; b(r_o)$$

ein Maß für die "Verschleierung" des Landoltringbildes ist.

Nach der Festlegung in (50) für die Objektverteilung des Landoltringes geht vom Landoltring eine für alle Flächenelemente gleiche Intensität aus, während die Umgebung, der Untergrund des Landoltringes keine Intensität aussendet.

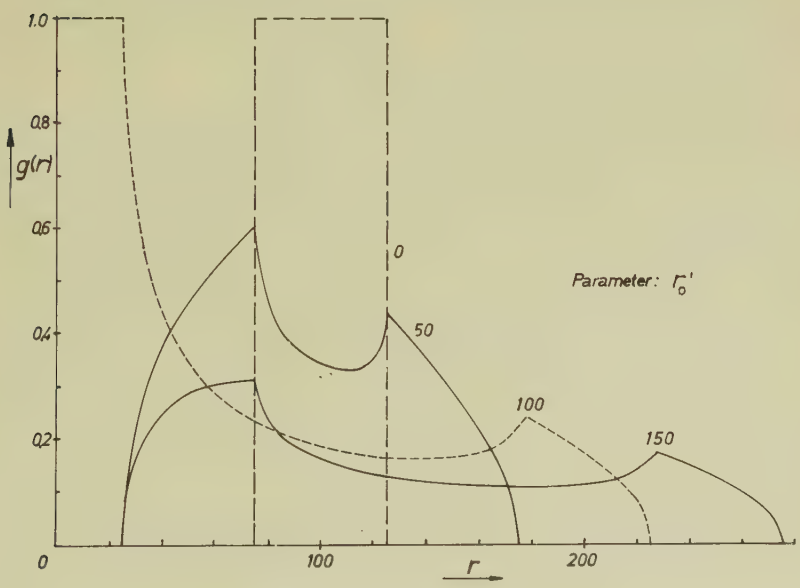


Abb. 24: Gewichtsfunktionen g(r) für Punkte auf dem Radius eines Kreisringes (Durchmesser: 250 Einheiten) im Abstand r_o vom Zentrum.

Im Fall des Röntgenphantoms mit den Landoltringen als Testobjekte verursachen diese allerdings infolge ihrer Strahlenschwächung eine Intensitätsminderung auf T (%) gegenüber der Umgebung. Dementsprechend gilt anstelle von Gl. (56) die folgende Beziehung

$$b''(r_o) = 1 - (1-T)\cdot b'(r_o) \,. \qquad (57)$$

Die Gewichtsfunktionen für die einfacheren Objekte Kreisring und Kreisscheibe für verschiedene Aufpunkte längs eines Radius wurden entsprechend der Berechnung von g_1 über ein Computer-Programm ermittelt. Zum Vergleich sind in Abb. 24 Gewichtsfunktionen für verschiedene Aufpunkte dargestellt. Der Kreisring hat denselben Außen- und Innendurchmesser wie der berechnete Landoltring, die resultierende Bildfunktion gibt daher mit guter Nährung die Intensitätsverteilung längs des Radius auch für den Landoltring wieder.

III. 2. Punktbilder des Gesamtabbildungssystems

Aus den Übertragungsfunktionen des Abbildungssystems Röntgenstrahlengang und Schirmbildsystem wurden für die verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen die entsprechenden Punktbilder über ein Computerprogramm errechnet. Diese Punktbilder beschreiben damit das Gesamtsystem bis zum phot. Prozess. Wie in II.2 schon beschrieben, unterscheiden sich die 5 verwendeten Filme im interessierenden Frequenzbereich nicht so stark wie die Leuchtschirme. Dabei haben Film Nr. 1 und 2 praktisch dieselbe MÜF, ebenso Nr. 3 und 4 , während Nr. 5 noch etwas über 3 und 4 in seiner Qualität liegt.
In Abb. 25 sind daher die Punktbilder des Gesamtsystems für die Schirme H,N,S und Film Nr. 3 und 4 (durchgehende Kurven) und Film Nr. 1 und 2 (unterbrochene Kurven) dargestellt. Die Punktbilder für H,N,S und Film Nr. 5 sind nur geringfügig besser als für Film Nr. 3 und 4, in der Zeichnung nicht unterscheidbar.

Das Punktbild des Projektionssystems ist in Abb. 26 dargestellt. Darin ist vorallem der Einfluß des Durchlichtprojektionsschirms zu sehen. Im folgenden wird mit diesem Punktbild die Abbildung der kleinsten verwendeten

Landoltringe berechnet werden, um einen etwaigen Einfluß auf das Gesamtsystem zu erfassen.

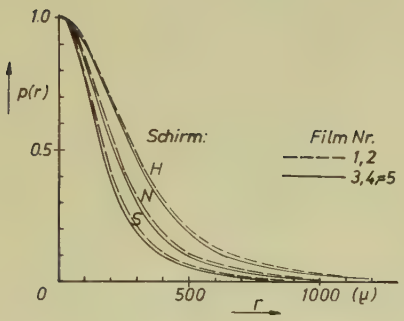


Abb. 25 :
Punktbildverteilungen des Gesamtabbildungssystem für die verschiedenen Schirm-Filmkombinationen, bezogen auf die Schirmebene .

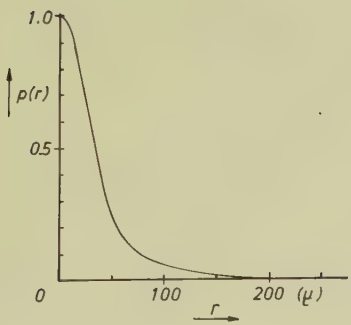


Abb. 26 :
Punktbildverteilung des Projektionssystems (Testapparatur), bezogen auf die Projektionsebene (entspr. Maßstab der Schirmebene).

III. 3. Errechnete Bildstrukturen

Für Landoltringe der Transparenz T=O sind in Abb. 27 die Bildverteilungen entsprechend den Punktbildern des abbildenden Systems (Abb. 25) dargestellt. Die Berechnung erfolgte mit den Gl. (54) und (56), wobei die Gewichtsfunktionen für einen Landoltring vom Durchmesser 250 Einheiten ausgelegt waren. Durch entsprechende Anpassung der Schrittweite des Punktbildes können die Bildverteilungen der verschiedenen Landoltringgrößen bestimmt werden.

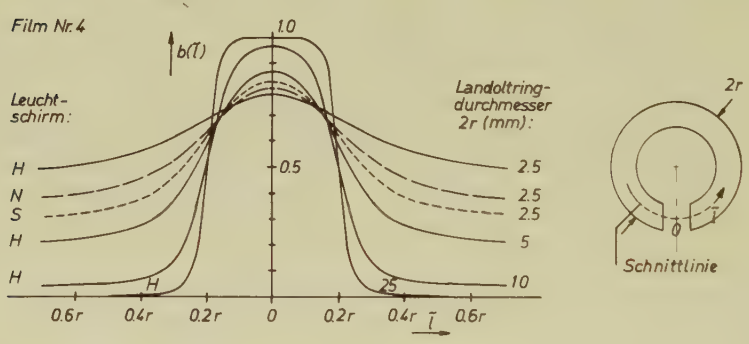


Abb. 27: Bildverteilung im Spaltbereich der verwendeten Landoltringe, errechnet für Film Nr. 4 und die Schirme H,N,S . Abszissenachse bezogen auf den äußeren Ringradius r .

Abb. 27 zeigt die Bildverteilungen für Landoltringe des Durchmessers 25, 10, 5, 2.5 (mm) unter den Punktbildern der verschiedenen Schirmbildsysteme . Da zwischen dem Schirmbildübertragungssystem und der visuellen Darbietung (Projektor + Auge) die Nichtlinearität des phot. Prozesses liegt, kann das Gesamtsystem nicht ohne weiteres formuliert werden. Aus den Abb. 25 und 26 geht hervor, daß das Punktbild des Projektionssystems in etwa dem Punktbild bzgl. Schirm H + Film Nr. 4 , in der Abszissenachse um den Faktor 10 gestaucht, entspricht. Der kleinste verwendete Landoltring mit 2.5 mm Ø wird durch die Projektion daher

etwa so abgebildet wie ein Ring mit 25 mm Ø durch Schirm H + Film Nr. 4 (Abb. 27, 28). Bei größeren Ringen tritt die geringe Unschärfe bei der Projektion überhaupt nicht mehr in Erscheinung.

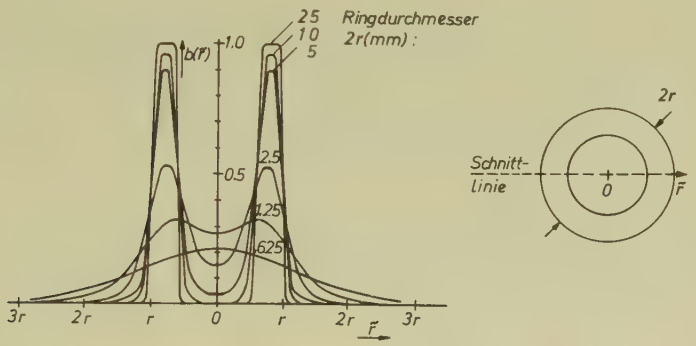


Abb. 28: Bildverteilung von Kreisringen, errechnet für Film Nr. 4 und Schirm 4. Abszissenachse bezogen auf den äußeren Ringradius r .

Die radiale Bildstruktur von Kreisringen für die verschiedenen Schirmbildsysteme (H, N, S mit Film Nr. 3 bzw. 4) und Ringdurchmesser von 25, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.625 (mm) ist in Abb. 28 dargestellt. Mit abnehmender Ringgröße sinkt für ein bestimmtes Übertragungssystem der Bildkontrast, bis schließlich die Ähnlichkeit zwischen Objekt und Bild verloren geht und anstelle einer Kreisringstruktur nur mehr die Struktur einer Kreisscheibe übrigbleibt.

Bildstrukturen einer Kreisscheibe für die Kombination Schirm H-Film Nr. 4 im Abbildungssystem und die Durchmesser 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 (mm) sind in Abb. 29 dargestellt. Kreisscheiben dieser Größen entsprechen in etwa den Ausschnitten von Landoltringen des Durchmessers 25, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.625 (mm) .

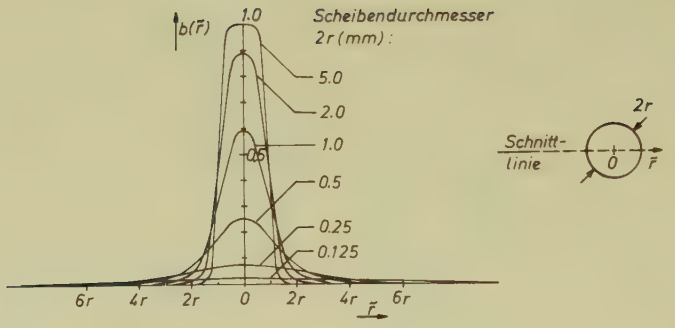


Abb. 29: Bildverteilung von Kreisscheiben, errechnet für Film Nr. 4 und Schirm H. Abszissenachse bezogen auf den Scheibenradius r.

III. 4. Signalspektren der Bild- und Objektfunktionen und Beziehung zu den Bildstrukturen.

Die Fouriertransformierte einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung b(x,y), z.B. der Bildfunktion, errechnet sich entsprechend Gl. (4) nach

$$F_b(u,v) = \iint b(x,y) \cdot \exp(-2\pi i (ux+vy)) \, dx\,dy. \qquad (58)$$

Meist interessiert bei diesem komplexen Ortsfrequenzspektrum $F_b(u,v)$ nur der Betrag $|F_b(u,v)|$, z.B., wenn die Phasenbeziehungen verschiedener Funktionen konstant sind. Das Quadrat über den Betrag $|F_b(u,v)|$, das "Wienerspektrum"

$$W_b(u,v) = |F_b(u,v)|^2 \qquad (59)$$

steht über eine Fouriertransformation in Beziehung zur Autokorrelationsfunktion

$$A_b(\xi,\eta) = \iint b(x,y) \cdot b(\xi - x, \eta - y) \, dx\,dy \qquad (60)$$

$$W_b(u,v) = \iint A_b(\xi,\eta) \cdot \exp(-2\pi i (u\xi + v\eta)) \, d\xi\,d\eta. \qquad (61)$$

Das Wienerspektrum $W_b(u,v)$ der Bildfunktion $b(x,y)$ steht über die MÜF $M(u,v)$ in Beziehung zum Wienerspektrum $W_g(u,v)$ der Objektfunktion:

$$W_b(u,v) = W_g(u,v) \cdot |M(u,v)|^2 . \tag{62}$$

Die MÜF des verwendeten Übertragungskanals sind bekannt, das Wienerspektrum der Objektfunktion kann berechnet werden. Für die interessierenden rotationssymmetrischen Objekte, Kreisring und Kreisscheibe, genügt die eindimensionale Darstellung

$$W_b(v) = W_g(v) \cdot |M(v)|^2 . \tag{63}$$

Das Ortsfrequenzspektrum $F_g(v)$ einer Kreisscheibe vom Radius R bestimmt sich gemäß

$$F_g(v) = \int_0^R \mathcal{J}_0(2\pi v r) r\,dr \Big/ \int_0^R r\,dr . \tag{64}$$

Mit der Beziehung

$$\frac{d}{dz} z^p \cdot \mathcal{J}_p(z) = z^p \cdot \mathcal{J}_{p-1}(z) \tag{65}$$

zwischen Besselfunktionen von aufeinanderfolgendem Index p ergibt sich für p = 1 und Integration über z = 2πvr

$$\mathcal{J}_1(2\pi v R) = 2\pi v R \cdot \int_0^R \mathcal{J}_0(2\pi v r) r\,dr$$

und in Gl. (64) eingesetzt

$$F_g(v) = \frac{\mathcal{J}_1(2\pi v R)}{\pi v R} . \tag{66}$$

Für eine Kreisscheibe vom Durchmesser 0.5 (mm) folgt für das Wienerspektrum

$$W_g(\nu) = \left| \frac{J_1(0.5\pi\nu)}{0.25\pi\nu} \right|^2 . \qquad (67)$$

Das Wienerspektrum für einen Kreisring vom Außendurchmesser 2.5 mm und Innendurchmesser 1.5 mm kann ebenfalls über die Spektralfunktionen der anteiligen Kreisscheiben nach Gl. (67) bestimmt werden:

$$W_g(\nu) = \left(\frac{6.25}{4} \cdot \frac{J_1(2.5\pi\nu)}{1.25\pi\nu} - \frac{2.25}{4} \cdot \frac{J_1(1.5\pi\nu)}{0.75\pi\nu} \right)^2 \qquad (68)$$

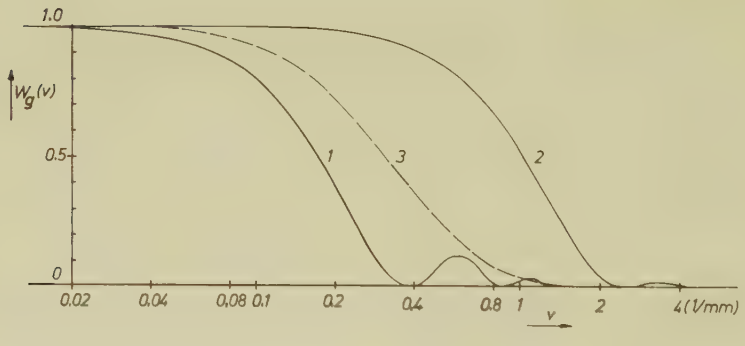


Abb. 30: Radiale Objektspektren $W_g(\nu)$: Kreisring, Ø außen = 2.5 mm, Ø innen = 1.5 mm, (1), Kreisscheibe, 0.5 mm Ø, (2) und Filterfunktion $|MTF(\nu)|^2$ für das Abbildungssystem mit Schirm H und Film Nr. 4 (3).

In Abb. 30 sind die beiden Wienerspektren nach Gl. (67) und (68) zusammen mit der Filterfunktion $|M(\nu)|^2$ des Abbildungssystems (H-Schirm und Film Nr. 4) wiedergegeben.

Die Wienerspektren der Kreisscheiben und Kreisringe anderer Durchmesser D = 2R sind in der Darstellung mit log. Abszissenachse parallele Kurven mit den Abständen von log(D/0.5) bzw. log(D/2.5) Einheiten. Durch die Filterfunktion $|M(v)|^2$ werden die Objektspektren zu entsprechenden Wienerspektren der Bildverteilungen verändert. Diese sind für Kreisscheiben der Durchmesser 5...0.125 mm und für Kreisringe der Außendurchmesser 25...0.625 mm in Abb. 31 und 32 dargestellt. Interessant wird der Vergleich der radialen Bildverteilungen der Kreisringe (Abb. 28) mit deren radialen Bild-Wienerspektren (Abb. 31).

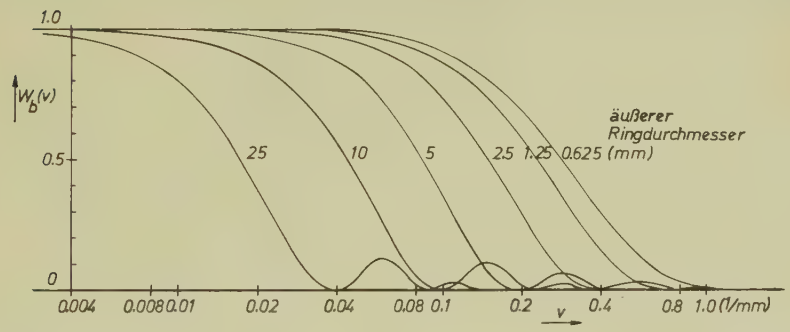


Abb. 31: Radiale Bildspektren $W_b(v)$ von Kreisringen (Ø außen: innen= 5:3) abgebildet durch das System mit Schirm H und Film Nr. 4 .

Bei der Kreisringabbildung wird der Kontrast der Bildstruktur mit abnehmender Ringgröße geringer bis schließlich die eigentliche Ringstruktur verlorengeht und das Bildspektrum des Ringes vom Durchmesser 0.625 mm in das Spektrum einer unscharfen Kreisscheibe übergeht. Entscheidend für die Wiedergabe der Ringstruktur scheint danach das Auftreten des 1. Maximums im Wienerspektrum der Bildverteilung zu sein, während das 2. Maximum noch Kontrast und Schärfe anhebt.

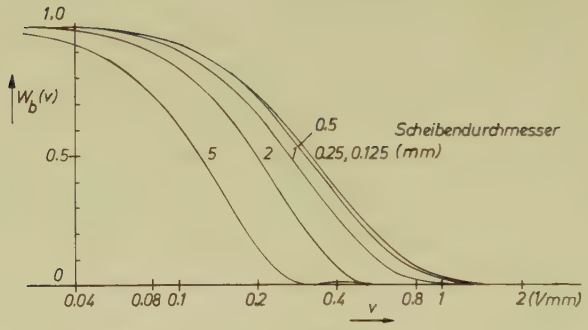


Abb. 32: Radiale Bildspektren $W_b(v)$ von Kreisscheiben, abgebildet durch das System mit Schirm H und Film Nr. 4.

Die radialen Wienerspektren der Kreisscheibenbilder nähern sich bei kleineren Scheibendurchmessern der Filterfunktion $|M(v)|^2$, was bedeutet, daß Scheiben vom Durchmesser 0.25 und 0.125 mm praktisch als Punktbilder des abbildenden Systems wiedergegeben werden. Das 1. Maximum im Wienerspektrum der Bildverteilung beeinflußt nur die Schärfe der Abbildung.
Die Überlegungen zu den Kreisringobjekten lassen sich praktisch auf die mittlere radiale Bildstruktur der abgebildeten Landoltringe übertragen, während die berechneten Kreisscheiben zu den Kreisringen in einem Größenverhältnis von 1:5 betrachtet werden, entsprechend dem Verhältnis von Landoltringschlitz zu - Durchmesser.
Für das Abbildungssystem mit Schirm H und Film Nr. 4 kann als prinzipielle Minimalgröße abbildbarer Landoltringe von der Radialstruktur her ein Außendurchmesser von 1 mm angegeben werden. Diese Grenze kann durch Berechnungen der Bildstruktur am Mittenkreis noch nach oben verschoben werden. Der Wert von 1 mm Ø außen lässt Rauschen und nachfolgende Abbildungsstufen unberücksichtigt und liegt deshalb stark unter dem praktischen Minimaldurchmesser, der etwa 2 mm betragen dürfte.

C. Automatisches Abtastphotometer zur Kennzeichnung der Rauschstrukturen und zur Bildanalyse

In der vorliegenden Aufgabe, die Einflüsse der Abbildungskette auf die Detailerkennbarkeit zu untersuchen, bietet die Modulationsübertragungsfunktion ein brauchbares Werkzeug zur Kennzeichnung der Abbildungseigenschaften der Einzelglieder anhand der Verwaschung, die die Bildstruktur erfährt. Daneben üben aber statistische Störsignale, verursacht durch die Quantenstruktur des übertragenden Mediums und die statistische Flächenstruktur der Umsetzer, einen starken Einfluß auf die Signalerkennbarkeit aus. Eine objektive Kennzeichnung der sogenannten "Rauschstrukturen" erscheint demnach sehr wichtig. Parallel dazu geht die Überlegung, diesen Einfluß des Rauschens auf die Detailerkennbarkeit zu verringern und die Möglichkeiten einer automatischen Bildanalyse zu untersuchen.

I. Möglichkeiten zur Kennzeichnung von Rauschstrukturen

Zur Kennzeichnung der Rauschstrukturen werden objektive Methoden - Photometerabtastung der interessierenden Struktur und Weiterverarbeitung der el. Signale zu einer statistischen Funktion - verwendet, aber auch subjektive Methoden. Als solche von verschiedenen Autoren angewandte subjektive Methode dient die Bestimmung der Distanz, bei der eine bestimmte Rauschstruktur als gleichmäßig erscheint.

I. 1. Rauschspektren und Autokorrelationsfunktionen

Die Autokorrelationsfunktion über die statistische Verteilung $r(x,y)$, die innerhalb eines gewissen Flächenbereiches F die Rauschstruktur objektivieren möge, lässt sich wie folgt errechnen:

$$A_r(\xi,\eta) = \lim_{F\to\infty} \frac{1}{F} \iint_F r(x,y)\cdot r(\xi-x,\eta-y)\,dx\,dy. \qquad (69)$$

Das Integrationsgebiet F soll möglichst groß sein, um den statistischen Fehler der errechneten Funktion klein zu halten, andererseits muß r(x,y) innerhalb von F stationär sein, d.h., r(x,y) darf sich innerhalb F nicht systematisch ändern. Von einer Zeitabhängigkeit der Größe r(x,y) kann in dieser Arbeit abgesehen werden, die verwendeten Rauschstrukturen sind zeitlich konstant. Wird die Rauschstruktur nicht als Energiedichtefunktion oder ähnliche auf die Signalstruktur beziehbare Funktion beschrieben, so empfiehlt sich die Normierung auf das mittlere Intensitätsniveau T am Ausgang der Übertragungskette:

$$T = \lim_{F\to\infty} \frac{1}{F} \iint_F r(x,y)\, dx dy . \tag{70}$$

Mit den auf $\overline{T}$ bezogenen Größen

$$n(x,y) = \left(r(x,y) - \overline{T} \right) / \overline{T} \tag{71}$$

ergibt sich als Autokorrelationsfunktion $A_n(\xi,\eta)$

$$A_n(\xi,\eta) = \lim_{F\to\infty} \frac{1}{F} \iint_F n(x,y) \cdot n(\xi - x, \eta - y)\, dx dy \tag{72}$$

$$= A_r(\xi,\eta) / \overline{T}^2 - 1 .$$

Die Autokorrelationsfunktion ist infolge der Flächennormierung endlich. Durch Fouriertransformation kann daraus das Wienerspektrum der Rauschstruktur errechnet werden:

$$W_n(u,v) = \iint A_n(\xi,\eta) \cdot \exp(-2\pi i (u\cdot\xi + v\cdot\eta))\, d\xi d\eta . \tag{73}$$

Auch für die Wienerspektren der Rauschstrukturen am Eingang und Ausgang eines linearen Übertragungssystems mit der MÜF M(u,v) gilt innerhalb eines Isoplanasiebereichs die Beziehung

$$W_{n2}(u,v) = W_{n1}(u,v) \cdot |M(u,v)|^2 . \tag{74}$$

Unter isotropen Bedingungen ist die Autokorrelationsfunktion nur eine Funktion von $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ und die Gleichungen (73) und (74) reduzieren sich zu

$$W_n(\nu) = 2\pi \int A_n(r) \cdot \mathcal{J}_0(2\pi\nu r) \cdot r\,dr \qquad (75)$$

bzw.

$$W_{n2}(\nu) = W_{n1}(\nu) \cdot |M(\nu)|^2 . \qquad (76)$$

Die Rücktransformation lautet wie bei Gl. (9) und (10) entsprechend

$$A_n(r) = 2\pi \int W_n(\nu) \cdot \mathcal{J}_0(2\pi\nu r)\,\nu\,d\nu \qquad (77)$$

Der Wert der Autokorrelationsfunktion $A_n(r=0)$ ist gemäß der Definition nach Gl. (72) identisch mit der mittleren quadrierten rel. Rauschintensität $\overline{n(x,y)^2}$, im folgenden bezeichnet mit der Varianz σ^2:

$$\sigma^2 = 2\pi \int W_{n1}(\nu) \cdot |M(\nu)|^2 \,\nu\,d\nu . \qquad (78)$$

Nimmt man an, daß das Eingangsspektrum $W_{n1}(\nu)$ ein "weißes Rauschen" beschreibt, d.h., innerhalb des Frequenzbereichs, für den $|M(\nu)|^2$ nicht verschwindet, gelte $W_{n1}(\nu) = 1$, dann wird die Varianz σ_0^2 durch das Abbildungssystem auf den Wert σ^2 vermindert:

$$\sigma^2/\sigma_0^2 = \int |M(\nu)|^2 \cdot \nu\,d\nu \;/\; \int W_{n1}(\nu) \cdot \nu\,d\nu . \qquad (79)$$

Unterscheiden sich zwei Abbildungssysteme nur durch einen Faktor k im Frequenzmaßstab, $M_1(\nu) = M_2(k\nu)$, dann lässt sich bei weißem Eingangsrauschen für die entsprechenden Varianzwerte angeben:

$$\sigma_2^2/\sigma_1^2 = k^2 . \qquad (80)$$

Sind die beiden Abtastsysteme z.B. Kreisöffnungen mit den Durchmessern $2R_1$ und $2R_2$, gilt nach $M(v) = 2J_1(2\pi vR) / 2\pi vR$ auch $R_1 = k \cdot R_2$ und damit $k^2 = R_1^2\pi / R_2^2\pi = F_1 / F_2$. Gleichung (80) nimmt damit die Gestalt der Selwynschen Beziehung an:

$$\sigma_2^2/\sigma_1^2 = F_1/F_2 \quad \text{bzw.} \quad \sigma^2 \cdot F = \text{konst.} \tag{81}$$

Erhält man im Experiment bei Abtastung einer Rauschstruktur und Variation der Abtastfläche F für $\sigma^2 \cdot F = G$ einen konstanten Wert, dann ist damit bestätigt, daß das Rauschen "weiß" bzgl. des Frequenzbereichs der verschiedenen Abtastöffnungen ist, bzw. keine Korrelationen von Abtastbereichen im Abstand der Durchmesser 2R bestehen.

I. 2. Subjektive Methoden

Zur Kennzeichnung der subjektiv erscheinenden Rauschstruktur, bezeichnet als "Körnigkeit" (graininess) wird meist der Betrachtungsabstand (blending distance) ermittelt, bei dem die Vorlage als gleichmäßig erscheint (MEES).

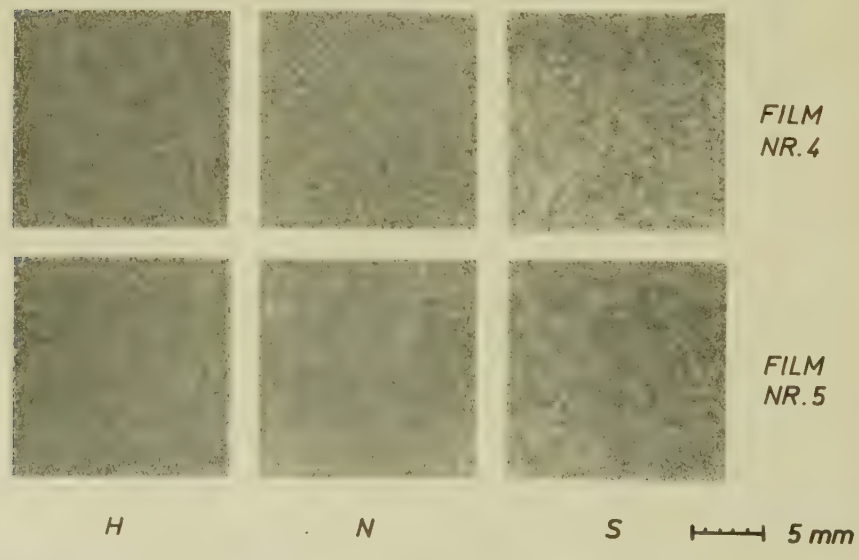


Abb. 33: Schirm-Film-Strukturen in der Projektionsebene.

Die Rauschstrukturen der in dieser Arbeit gemachten Phantomaufnahmen wurden ebenfalls subjektiv bewertet, allerdings durch ein Skalierungsverfahren unter den Bedingungen der Testmessungen. Dargeboten wurden die Testdias der Schirm-Film-Kombinationen bei einem Betrachtungsabstand von 40 cm und mittlerer Leuchtdichte von 60 asb. In Abb. 33 sind Proben aus Aufnahmen von Film Nr. 4 und 5 mit den Schirmen H, N, S entsprechend den am Projektionsschirm erscheinenden Strukturen wiedergegeben. Bewertet wird jeweils der Bereich zwischen den Landoltringen der Phantomaufnahmen bei folgender Skalierungsgrundlage: 1 = gleichmäßiges Feld, 2 = leichte Struktur, 3 = deutliche Struktur, 4 = starke Struktur, 5 = grobe Struktur. Die nach einer Probedarstellung festgehaltenen Aussagen erwiesen sich als sehr gut reproduzierbar, wobei eine Erhöhung des Abstandes von 40 auf 80 cm nur eine geringe Änderung der Aussagen ergab.

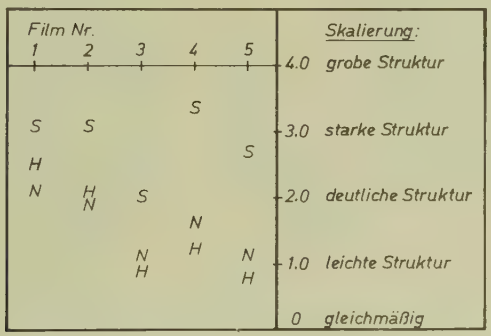


Abb. 34: Subjektive Wertung der Schirm-Film-Rauschstrukturen. Betrachtungsabstand: 40 cm, mittlere Leuchtdichte: 60 asb.

Weitere Vergrößerung des Betrachtungsabstandes hatte wie zu erwarten ein stetiges Abfallen des "erscheinenden Rauschens" zur Folge. Bei Mittelung über die Ergebnisse der verschiedenen Beobachter ergibt sich das in Abb. 34 dargestellte Bewertungsschema für die verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen der Phantomaufnahmen. Wesentliches Merkmal der Abb. 34 ist die weitgehend ähnliche Bewertung der Schirme H und N durch diese psycho-

physische Methode, während Aufnahmen mit Schirm S als wesentlich stärker strukturiert empfunden werden.

II. Automatisches Abtastphotometer

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein eigenes Abtastphotometer entwickelt und gebaut, das die Objektivierung der Transparenzverteilung eines Objektes, in in diesem Fall eines phot. Negativs, in Gestalt einer Transparenzmatrix gestattet.

1. Konzept des Photometers

Zunächst soll das Photometer den Transparenzverlauf der Probe (phot. - Negativ) als Folge von diskreten Werten liefern.
Die Quantisierung des quasi-kontinuierlichen Transparenzverlaufs ermöglicht den direkten Einsatz von Computern. Der Meßvorgang erfolgt bei stationärem Transparenzwert der Probe. Dadurch ist mit dieser Anlage möglich, auch bei sehr schwachen und damit verrauschten Signalen das zeitliche Rauschen der elektronischen Meßanordnung durch optimal angepasste Siebglieder zu eliminieren. Besonders wirksam ist dies bei Messungen, deren zu verarbeitende Signale bereits in die Größenordnung des Eigenrauschens der Meßanordnung kommen. Gegenüber einem stetig durchlaufenden Photometer mit elektronischer Anlage zur Signalabfragung, in festen Zeitintervallen bei kurzer Abfragezeit, kommt dies ebenfalls als Vorteil zum Tragen: Bei sehr kurzer Abfragezeit wirkt sich das zeitliche statistische Rauschen des Signals durch das Eigenrauschen der Meßanordnung (z.B. SEV) sehr stark aus, während bei längerer Abfragezeit die Messung nicht den interessierenden Wert, sondern einen Mittelwert über einen größeren Bereich liefert.
Durch automatische Umschaltung vom Meßstrahlengang auf einen Vergleichsstrahlengang soll die Empfindlichkeit der Meßordnung über den ganzen Meßvorgang stabil gehalten werden.
Endlich könnte diese Anlage bei Abtastung einer zweidimensionalen Matrix zur automatischen Bildanalyse dienen.

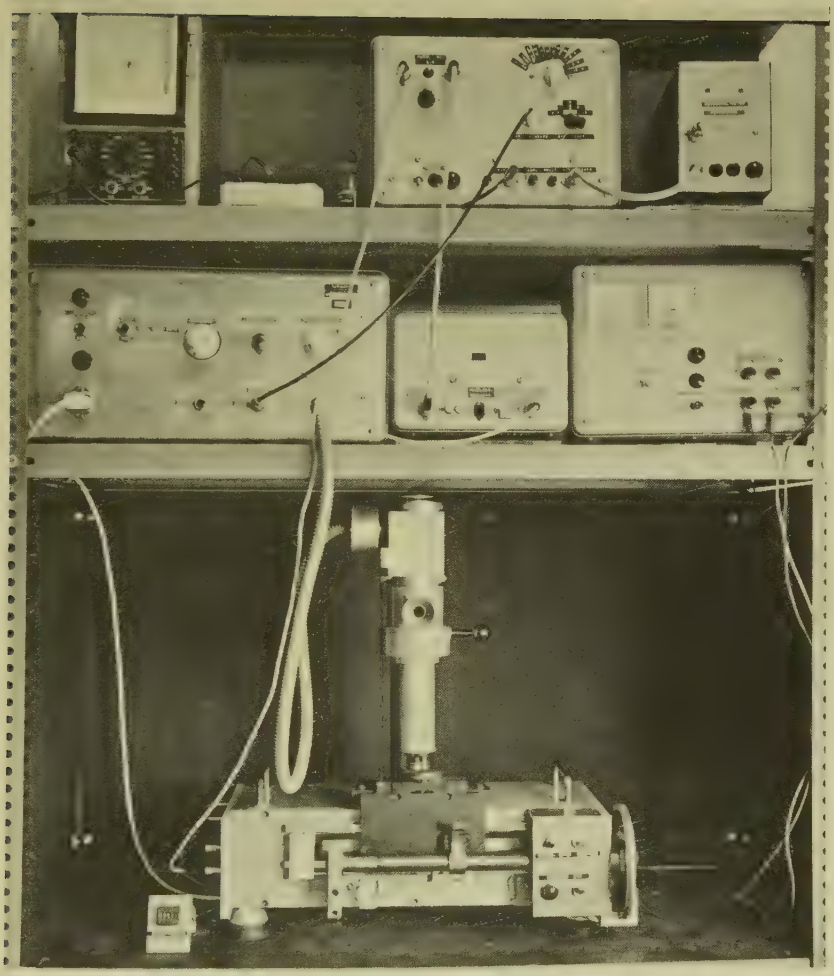


Abb. 35: Gesamtansicht der Photometeranordnung: Digitales Abtastphotometer mit Schalt- und Meßelektronik .

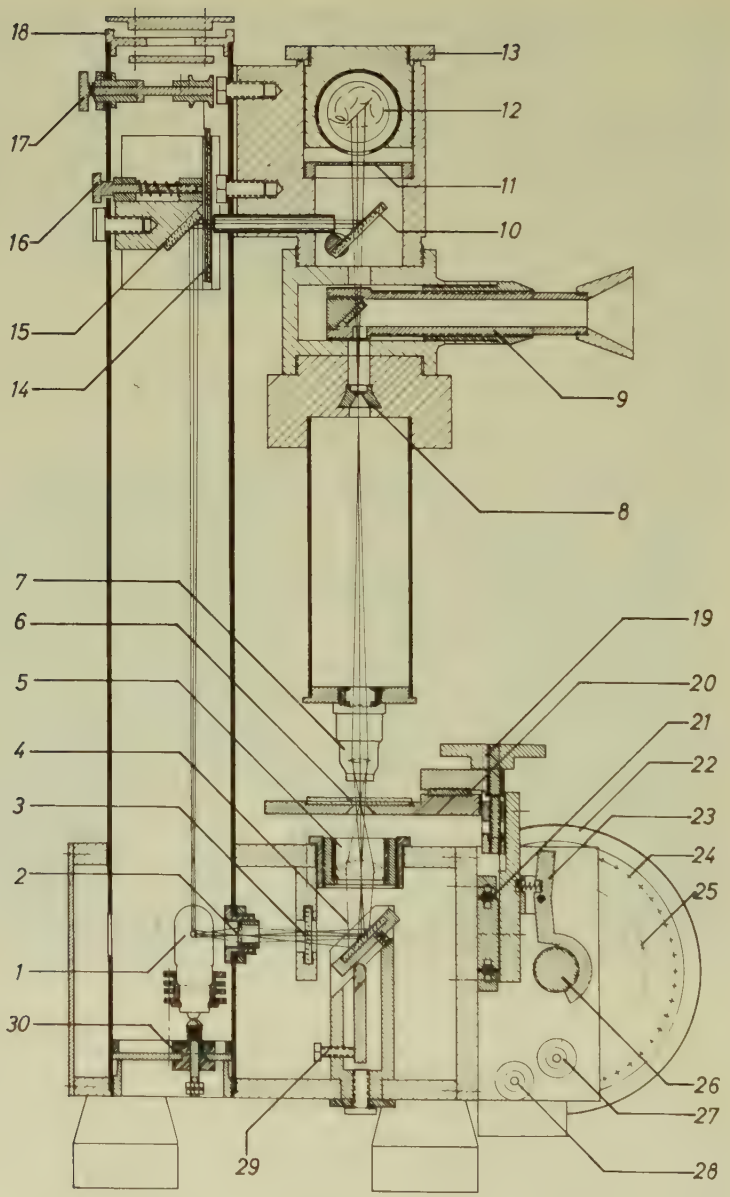


Abb. 36: Gesamtschnittzeichnung des Abtastphotometers.
Ansicht bei der Vergleichsmessung

Bezeichnung der in den Gesamtschnittzeichnungen Abb. 36 und 37 mit Ziffern versehenen Einzelteile:

1 Photometerlampe (Osram, 6V, 5A)

2 Kollektor

3 Wärmeschutzfilter

4 Oberflächenspiegel zur Umlenkung des Beleuchtungsstrahlengangs

5 Kondensor (symbolisch als Einzellinse dargestellt)

6 Filmprobe (zwischen Diagläsern)

7 Mikroobjektiv 6.3/016 (symbolisch als Einzellinse dargestellt)

8 Einschub mit Mattscheibe(Abb. 36) bzw. Lochblende (Abb. 37)

9 Einblick auf Mattscheibe zum Scharfstellen (über Oberflächenspiegel), in Abb. 36 in den Strahlengang eingeschoben, in Abb. 37 in Meßstellung

10 Oberflächenspiegel zur Einspiegelung des Vergleichsstrahlengangs (Abb. 36), in Abb. 37 Meßstellung

11 Lochblende, 5.6 mm Ø

12 Sekundärelektronenvervielfacher, SEV (RCA 931A)

13 Feststellring für SEV-Fassung

14 Vergleichsfilter verlaufender Transparenz (Film zwischen Plexiglasscheiben)

15 Oberflächenspiegel zur Umlenkung des Vergleichsstrahlengangs

16 Arretierungsvorrichtung für das Vergleichsfilter

17 Einstellvorrichtung für das Vergleichsfilter

18 Lichtdichter Belüftungskamin

19 Spindel zur Höhenverstellung des Photometertisches

20 Walzenlagerung des Photometertisches zur Einrichtung des Tisches

21 Führung des Photometertisches

22 Steuerungslochscheibe

23 Grobverstellvorrichtung des Photometertisches

24 Bohrung für Steuerung des elektron. Schrittschaltwerks

25 Bohrung für Steuerung der Vergleichsschaltung

26 Welle für Photometervorschub

27 Lämpchenfassung für elektron. Schrittschaltwerk, auf der anderen Seite der Lochscheibe als Empfänger eine Halbleiterphotodiode BPY 44

28 Lämpchenfassung für Vergleichsschaltung (entspr. 27)

29 Einstellvorrichtung für Oberflächenspiegel

30 Lampenfassung

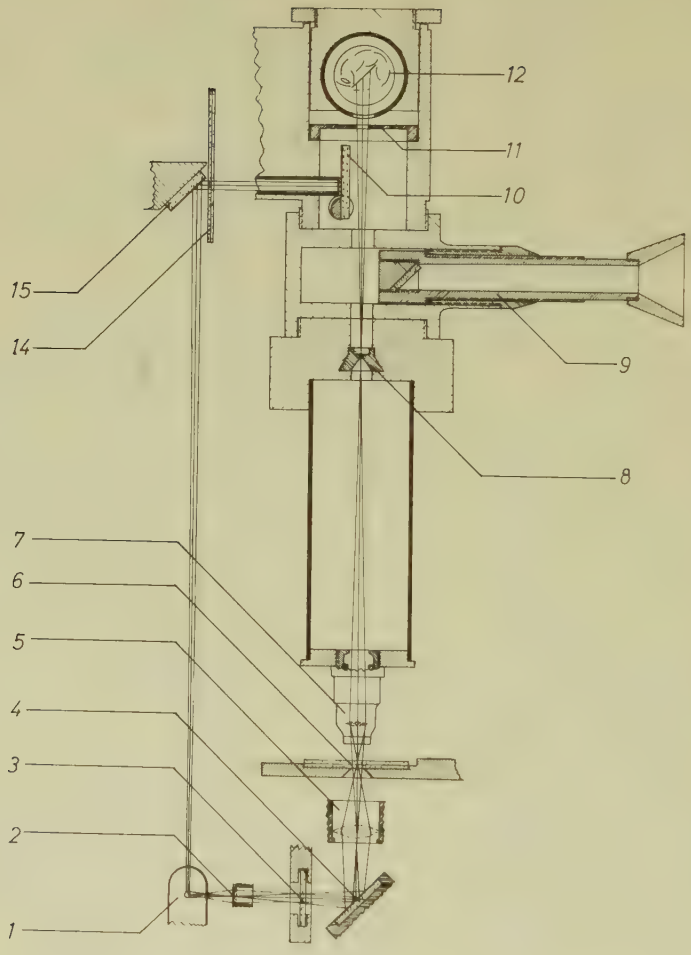


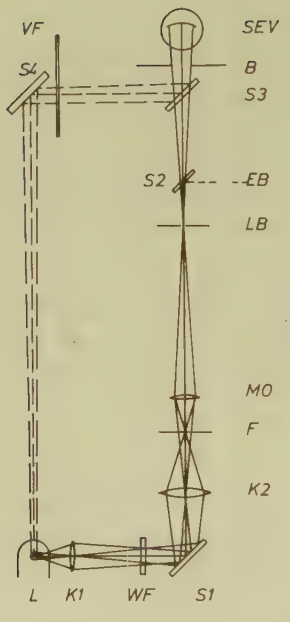
Abb. 37: Gesamtschnittzeichnung des Abtastphotometers. Ansicht bei der Meßstellung

2. Optischer und mechanischer Aufbau

Abb. 35 zeigt die Gesamtanordnung, während die Querschnittzeichnungen Abb. 36, 37 Einzelteile und Funktionen derselben wiedergeben. Der mechanische Aufbau des Photometers wird deshalb nur funktionsgemäß beschieben:

Das Chassis trägt rechts die Steuerungslochscheibe für den Vorschub des Photometertisches. Die Lochscheibe hat auf einem äußeren Radius 50 äquidistante Bohrungen, durch die bei entsprechender Stellung der Lochscheibe das Licht eines Glühlämpchens auf eine Photodiode fällt. Die Lochscheibe wird über ein Untersetzungsgetriebe durch Keilriemen von einem Elektromotor angetrieben, der elektronisch geschaltet wird. Diese Schaltelektronik befindet sich als Einschub auf der linken Seite des Chassis. Über einen zweiten Bohrungskreis auf der Lochscheibe und ein Paar Lichtquelle-Photodiode wird die Umschaltung vom Messtrahlengang auf den Vergleichsstrahlengang gesteuert. Der Vergleichsstrahlengang verläuft im Standrohr, ausgehend vom Beleuchtungssystem im Chassis über den Umlenkspiegel zum SEV im Messkopf. Dieser Messkopf mit dem Messrohr wird vom Standrohr getragen. Das Messrohr enthält ein abbildendes Mikroobektiv 6.3/0.16, eine einschiebbare Messlochblende von 20μ Ø, ein einschiebbares Beobachtungsrohr zur Scharfeinstellung der Bildstruktur auf eine Mattscheibe, die hierbei an die Stelle der Lochblende tritt, und den SEV (RCA 931A).

In Abb. 38 ist der Photometerstrahlengang schematisch dargestellt. Im Meßstrahlengang wird ein "Köhlersches Beleuchtungssystem" verwendet. Dadurch wird einmal die numerische Apertur des Mikroobjektivs voll ausgeleuchtet und andererseits eine gleichmäßige Beleuchtung der Filmprobe erreicht. Die Filmprobe wird durch das Mikroobjektiv in die Ebene einer engen Lochblende abgebildet. Ein SEV registriert die Transparenz der entsprechenden Abtastfläche. Über einen Umlenkspiegel kann der Vergleichsstrahlengang auf den SEV geleitet werden.



SEV	Sekundärelektronen-vervielfacher
B	Blende
S3	Einklappspiegel
VF	Verlaufsfilter
S4	Oberflächenspiegel
S2	Einschubspiegel
EB	Einblickrichtung
LB	Lochblende
MO	Mikroobjektiv
F	Filmprobe
K2	Kondensor
S1	Oberflächenspiegel
WF	Wärmeschutzfilter
K1	Kollektor
L	Lampenwendel

Abb. 38 : Schematischer Strahlengang des Photometers.

Unmittelbar hinter der Lichtquelle L befindet sich der Kollektor K_1, dessen Fassung als "Sehfeldblende" oder "Leuchtfeldblende" EL dient. Hinter dem Kollektor K_1 folgt das Wärmeschutzfilter WF und der Umlenkspiegel S_1. Durch den Kondensor K_2 wird die Sehfeldblende EL optisch verkleinert als Austrittsluke in die Filmobene F abgebildet. Die Sehfeldblende bestimmt den ausgeleuchteten Bereich der Filmprobe. Die Lampenwendel L wird durch K_1 vergrößert in die Ebene des Kondensors K_2 abgebildet. Die Anordnung wurde so gewählt, daß bei der eingestellten Vergrößerung die Mikroobjektivapertur gerade voll ausgeleuchtet wird und die Fassung des Mikroobjektivs MO so als Aperturblende wirkt. Durch das Mikroobjektiv MO wird die gleichmäßig ausgeleuchtete Filmprobe F vergrößert in die Ebene der Lochblende LB abgebildet und die Transparenz des zur Lochblendenöffnung konjugierten Bereichs von einem SEV gemessen. Die dem SEV vorgeschaltete Blende B

dient der Streulichtabschirmung und definiert die Apertur des Vergleichsstrahlengangs, ist aber ohne Einfluß auf die Apertur des Meßstrahlengangs. Wird die Lochblende LB durch einen Mattscheiben-Einschub ersetzt und der Spiegel S_2 in den Meßstrahlengang eingeschoben, so kann über den Einblick B die Filmstruktur auf die Mattscheibenebene (identisch mit der Ebene der Lochblende) scharfgestellt werden. Der Vergleichsstrahlengang wird durch den Spiegel S_4 umgelenkt, durch ein Vergleichsfilter VF verlaufender Transparenz abgeschwächt und über den Umlenkspiegel S_3 und die begrenzende Blende B auf den SEV geleitet.

3. Schalt- und Meßelektronik

Die in der Photometeranordnung verwendete Elektronik hat drei Funktionen:

1) Messung und Registrierung der Filmtransparenz kleiner Abtastflächen,
2) automatischer Vorschub der Filmprobe um konstante kurze Wegstrecken mit einstellbarer Messzeit (bei stehender Filmprobe),
3) automatische Einstellung eines Vergleichsstrahlengangs und Nachregelung eventueller Empfindlichkeitsschwankungen der Photometeranordnung durch Nachstellen der SEV-Empfindlichkeit.

Im Blockschaltbild der Abb. 39 ist die Zuordnung der einzelnen Elemente der Photometerelektronik dargestellt. Die obere Hälfte der Abbildung zeigt die Meßelektronik, die untere Hälfte die Schaltelektronik.
Die Photometerlampe wird durch eine stabilisierte Spannungsquelle betrieben. Der Lichtstrom der Lampe wird durch das Beleuchtungssystem auf die zu messende Filmprobe geleitet. Der Abbildungsstrahlengang erfasst einen definierten kleinen Flächenbereich der Filmprobe und bringt einen der Filmtransparenz proportionalen Lichtstrom auf die Photokathode des SEV, die diesen in einen dazu proportionalen Elektronenstrom umsetzt. Der durch Sekundärelektronen verstärkte Strom bewirkt am Ausgangswiderstand (der Stufe SEV-Versorgung) einen prop. Spannungsabfall.

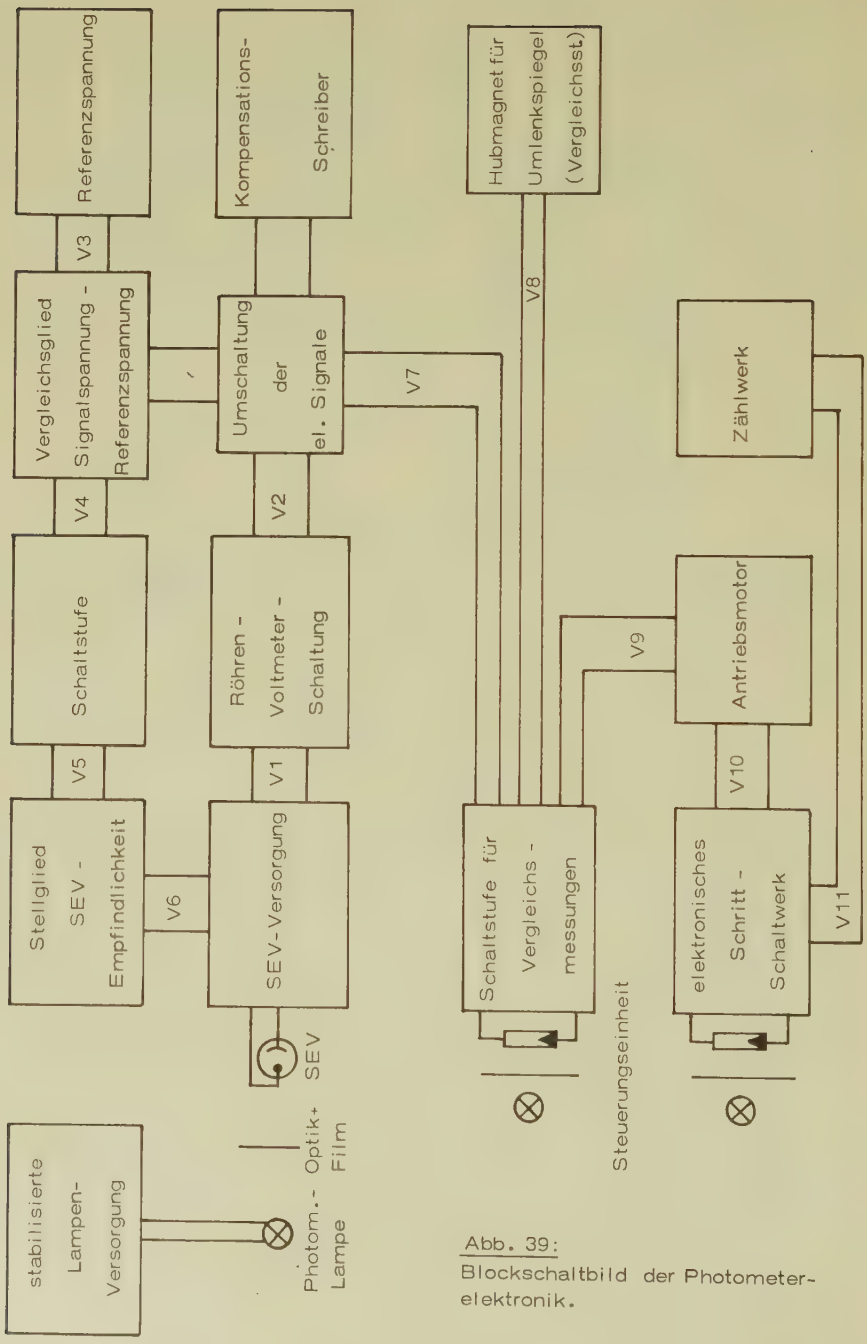


Abb. 39:
Blockschaltbild der Photometer-elektronik.

In der darauffolgenden Stufe gelangt diese Spannung auf den Eingang einer Brückenschaltung, entsprechend der Schaltung von Gleichspannungsröhrenvoltmetern. Vom rel. niederohmigen Ausgang geht das Signal auf den Eingang eines Kompensationsschreibers oder bei Einschaltung des Vergleichsstrahlengangs auf ein Vergleichsglied Signalspannung-Referenzspannung. Der Vorschub des Photometertisches erfolgt über eine Feingewindewelle mit 1 mm Steigerung, die durch ein Antriebsrad mit einem Gleichstrommotor gekoppelt ist. Das Antriebsrad trägt auf seinem Umfang 50 äquidistante Bohrungen, auf einem kleineren Kreis eine einzelne Bohrung. Durch diese Lochscheibe wird der Antrieb der Welle und damit der Filmvorschub gesteuert: Eine Halbleiterdiode registriert die Änderung der von einem Lämpchen ausgehenden, durch die Lochscheibe bestimmte Lichtintensität. Damit wird einmal das elektronische Schrittschaltwerk gesteuert, zum anderen die Schaltstufe des Vergleichsstrahlengangs. Die Schaltstufe für die Vergleichsmessung schaltet den Hubmagnet für den Umlenkspiegel, den Antriebsmotor für den Filmvorschub und das Element zur Umschaltung der el. Signale vom Schreiber auf das Vergleichsglied Signalspannung-Referenzspannung etc.. Differiert die Signalspannung von der (einstellbaren) Referenzspannung um mehr als eine äußerst geringe Schwellspannung, so spricht die darauffolgende Schaltstufe an und verändert über einen Servomotor die Stellung eines 10-gängigen Potentiometers in dem Sinne, daß durch die entsprechende Änderung der SEV-Empfindlichkeit die Signalspannung auf die Referenzspannung zuläuft.

Im folgenden sollen die einzelnen Stufen des Blockschaltbildes eingehender beschrieben werden.

Elektronische Schrittschaltung

Das primäre Steuerelement des Schrittschaltwerkes bildet die mit der Antriebswelle zum Photometertisch starr verbundene Lochscheibe, die auf einem Kreis 50 äquidistante Bohrungen von 1.5 mm Durchmesser aufweist. Beim Antrieb der Welle wird der von einem Linsenlämpchen ausgehende und in Richtung einer Photodiode fallende Lichtstrom durch die dazwischen befindliche Lochscheibe abgedeckt und nur für den Anteil, der dem Verhältnis Lochdurchmesser:Lochabstand entspricht, freigegeben.
Durch die elektronische Schaltung, deren erstes Glied die Photodiode bildet, soll der Antriebsmotor so geschaltet werden, daß die Lochscheibe jeweils um einen Lochabstand gedreht wird. Bei einer Steigerung der Welle von 1 mm ergibt dies einen Photometertischvorschub von 20 μ . Für einen einstellbaren Zeitraum, die Meßzeit, soll der Motor ausgeschaltet bleiben, um darauf den Tisch um weitere 20 μ weiterzuschieben.
Damit wird die Filmprobe in äquidistanten Schritten, (Schrittweite = Durchmesser der Abtastöffnung), gemessen. Gegenüber dem kontinuierlichen durchlaufenden Film hat dieses Verfahren den Vorteil, daß es eine nachträgliche Integration über die Abtastfläche und vorallem eine Korrektur des zeitlichen Verhaltens der Übertragungsglieder (MÜF + Rauschen) erübrigt.

Abb. 40 zeigt das Funktionsschema und Abb. 41 die Schaltung des elektronischen Schrittschaltwerks. Als zeitlicher Ausgangspunkt sei der Zustand gewählt, bei dem die Photodiode durch die Lochscheibe abgedeckt wird und der Motor die Welle mit Lochscheibe dreht. Sobald die Photodiode eine bestimmte Lichtintensität erhält, wird über einen Emitterfolger der Schmitt-Trigger geschaltet, d.h., der 2. Transistor, der im Ruhezustand leitend ist, wird gesperrt. Durch den schnellen Umschaltvorgang entsteht am Kondensator C_1 ein positiver Impuls, der den darauffolgenden Transistor in den leitenden Zustand schaltet. Dieser Transistor schaltet nur bei positiven Impulsen, entsprechend dem Einschaltvorgang an der 1. Stufe (Photodiode), während er bei negativen Impulsen, dem Ausschaltvorgang der 1. Stufe entsprechend, gesperrt bleibt.

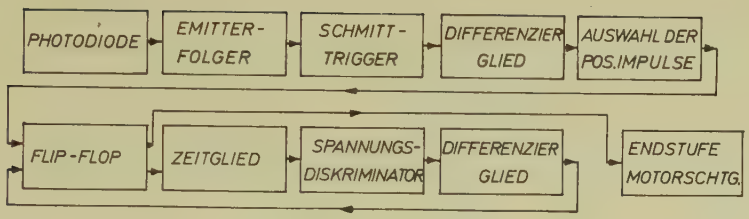


Abb. 40: Blockschaltbild des elektronischen Schrittschaltwerks

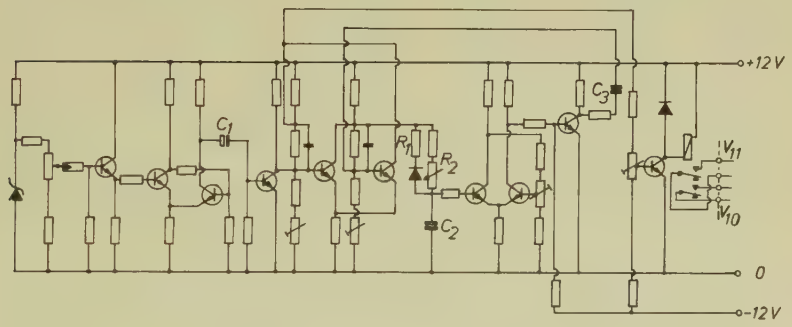


Abb. 41: Elektronisches Schrittschaltwerk

Von hier gelangt der Impuls verstärkt auf den Eingang I eines Flip-Flop, sperrt dessen 1. Transistor und schaltet den 2. Transistor in den leitenden Zustand. Mit dem Transistor 1 des Flip-Flop wird auch der die Schaltung des Motors bewirkende Endtransistor und damit der Motor gesperrt. Der Photometertisch steht. Bei diesem Umkippen wird der 2. Transistor des Flip-Flop eingeschaltet und entsprechend das Spannungsniveau des nachfolgenden Zeitgliedes angehoben. Der Kondensator C_2 des Zeitgliedes wird über den (verstellbaren) Widerstand R_2 aufgeladen. Der Parallelwiderstand R_1 ist über die Diode gesperrt. Überschreitet die Kondensatorspannung einen bestimmten Wert enger Toleranz, so schaltet die darauffolgende sehr schnelle Diskriminatorstufe: Der 1. Transistor dieser Stufe wird leitend, der 2. ge-

sperrt und der 3. Transistor wieder leitend. Über den Kondensator C_3, der mit den entsprechenden Widerständen ein Differenzierglied bildet, gelangt nur ein negativer Impuls an den Eingang II des Flip-Flop und schaltet nun wiederum den 2. Transistor des Flip-Flop aus und den 1. Transistor ein. Mit dem 1. Transistor wird auch der Endtransistor und damit der Motor eingeschaltet: Der Motor dreht die Antriebswelle und damit auch die Lochscheibe weiter bis die Photodiode (1.Stufe) wieder Licht erhält und sich der gesamte Vorgang wiederholt.
Mit dem Ausschalten des 2. Transistors im Flip-Flop wird das Zeitglied R_2C_2 über die Basiswiderstände des 2. Transistors kurzgeschlossen und C_2 kann über die nun leitende Diode und den geringen Widerstand R_1 mit einer Zeitkonstante, die etwa eine Größenordnung geringer als R_2C_2 ist, entladen werden.
Wie oben schon bemerkt, bleibt der negative Impuls an C_1, der beim Unterbrechen des auf die Photodiode fallenden Lichtstroms entsteht, durch den folgenden Transistor ohne Wirkung.

Durch Einschalten weiterer Flip-Flop-Stufen zwischen Flip-Flop und Endstufe kann die Schrittweite um entsprechende Faktoren vergrößert werden. Durch eine ähnliche Abzweigung könnte auch die Schaltung für die Vergleichsmessung bewirkt werden. Die Vergleichsmessung würde dann nach einer entsprechenden Zahl von Meßpunkten erfolgen, wobei der Rückstellimpuls auf die 1. Stufe der Flip-Flop-Gruppe gehen müsste. In der aufgebauten Schaltung wurde wie im folgenden beschrieben die direkte Steuerung über die Lochscheibe gewählt.

Schaltstufe für die Vergleichsmessung

Wie beim elektronischen Schrittschaltwerk folgt der Photodiode ein Emitterfolger, ein Schmitt-Trigger, ein Differenzierglied und eine Transistorstufe zur Auswahl der positiven Impulse (Abb. 42). Auf 50 Meßpunkte wird eine Vergleichsmessung durchgeführt, bzgl. der zu korrigierenden Abweichungen reichte das aus.

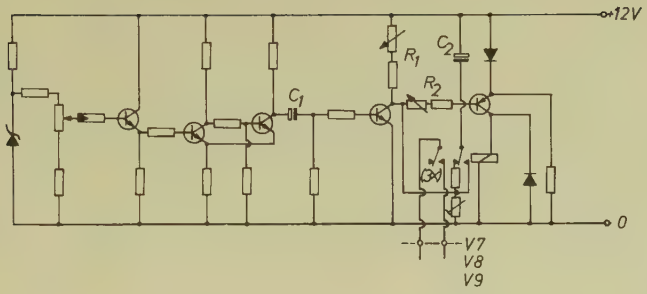


Abb. 42: Schaltstufe für die Vergleichsmessung

Die weitere Schaltung kann daher gegenüber dem Schrittschaltwerk (Abb.41) vereinfacht ausgelegt werden. Liegt die Basis des auf C_1 folgenden Transistors auf Nullpotential, dann ist dieser gesperrt und der Kollektor liegt auf Betriebsspannung. Damit ist auch der darauffolgende Endtransistor, über eine Diode vorgespannt, gesperrt und das Relais im Kollektorkreis ist abgefallen. Gelangt allerdings über C_1 ein positiver Impuls,- wie beim Schrittschaltwerk ist dies beim Wechsel hell-dunkel auf die Photodiode der Fall-, so wird der auf C_1 folgende Transistor für die Impulsdauer leitend und damit auch der Endtransistor. Das Relais zieht an und legt den praktisch auf volle Spannung aufgeladenen Kondensator C_2 über R_2 an die Basis des Endtransistors, der damit leitend ist und das Relais selbst im angezogenen Zustand hält, bis die Spannung am Kondensator über $R_1 + R_2$ + Emitter-Basis-Strecke so weit abgesunken ist, daß der Kollektorstrom den für das Relais notwendigen Haltestrom unterschreitet. Die Emittervorspannung des Endtransistors über eine Diode ergibt recht genaue Schaltzeiten, die über R_1 eingestellt werden können.

Meßelektronik: SEV-Versorgung und Röhrenvoltmeterschaltung

Der SEV wird aus einem stabilisierten Hochspannungsnetzgerät versorgt. Über einen Spannungsteiler werden den einzelnen Dynoden die Versorgungsspannungen zugeführt (Abb. 43). Durch wahlweises Kurzschließen von Widerständen R_v kann die am SEV liegende Gesamtspannung und damit dessen Empfindlichkeit verändert werden. Im selben Sinne arbeitet auch der als 10-gängiges Mikropotentiometer ausgeführte Widerstand P_1, durch den bei Schaltung der Stufe für Vergleichsmessung die Gesamtempfindlichkeit nachgestellt werden kann.

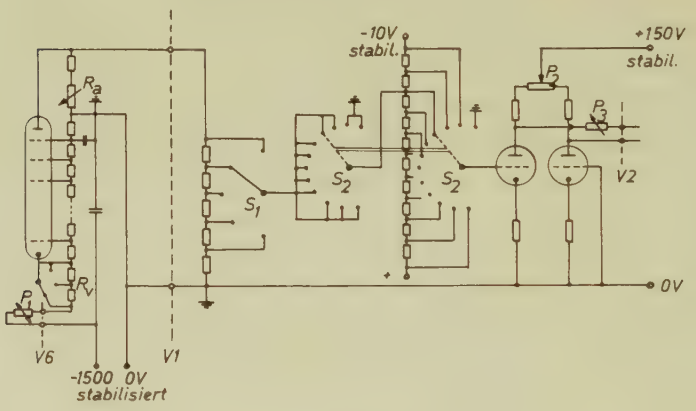


Abb. 43: Meßelektronik: SEV-Versorgung und Röhrenvoltmeterschaltung

Zwischen dem auf Masse liegenden Spannungsteilerende und der SEV-Anode liegt der veränderliche Außenwiderstand R_a, der über die Verbindung V_1 auf den Eingang der Röhrenvoltmeterstufe (Abk.: RVM) geschaltet ist.

Zwischen dem Elektronenstrom durch R_a und dem auf die Photokathode des SEV auftreffenden Lichtstrom besteht bei nicht zu großen Stromwerten und genügend großem Querstrom des Spannungsteilers Proportionalität. Durch Veränderung von R_a kann die Ausgangsspannung bzw. die Eingangsspannung

der RVM-Schaltung verändert werden. Den Eingang der RVM-Schaltung bildet ein Spannungsteiler S_1, der die Eingangsspannung wahlweise in den Stufen 1:1, 1:2, 1:4, 1:10, 1:20 reduziert.
Der mit 2 Schaltebenen versehene Stufenschalter S_2 gestattet in Schalterstellung 1 über P_2 die Einstellung des RVM-Nullpunkts, in Stellung 2 kann mit P_3 die Empfindlichkeit des RVM auf Schreibervollausschlag bei 500 mV eingestellt werden, in Stellung 3 wird die direkte Signalspannung aufgeschaltet und in den Stellungen 4 bis 12 die um bestimmte Differenzspannungen (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 V) reduzierte Signalspannung. Über diese Differenzspannungen kann die Skala der Meßwerte erheblich gespreizt werden, da die Standardempfindlichkeit für Vollausschlag des Schreibers 500 mV beträgt.
Vor einer Meßreihe wird der Nullpunkt und die Empfindlichkeit eingestellt. Darauf geht man bei Stellung 3 des Stufenschalters S_2 mit dem Spannungsteiler S_1 von der Reduktionsstufe 1:20 aus auf eine geeignete Stufe. Anschließend werden Differenzspannung und Empfindlichkeit entsprechend dem Verlauf der Meßwerte unter der vorhergehenden Bedingung so eingestellt, daß die Skala der Meßwerte über die gesamte Schreibbreite gespreizt ist.

Die Widerstandswerte des am Stufenschalter S_2 liegenden Spannungsteilers zur Gliederung der Differenzspannungen sind klein gegenüber den Werten des Spannungsteilers S_1. Dadurch bleibt die Gitterspannung der RVM-Schaltung unbeeinflußt vom Innenwiderstand der Differenzspannungsquellen.
Die beiden Röhren der RVM-Schaltung sind über gleiche Kathodenwiderstände vorgespannt und arbeiten im steilen linearen Bereich bei hohem Anodenstrom. Im Brückenzweig liegt über P_3 und die Verbindung V_2 der Kompensationsschreiber.

Die Linearität des Gesamtsystems wurde experimentell nachgeprüft und bestätigt.

Meßelektronik: Vergleich Signalspannung-Referenzspannung

Die Konstanz der Gesamtempfindlichkeit des Systems Photometerlampe-SEV-Röhrenvoltmeter muß über die Meßdauer gewährleistet sein. Auch bei guter Stabilisierung der Einzelsysteme kann es erfahrungsgemäß bei solchen Messungen zu einer Empfindlichkeitsdrift kommen. Zur Kontrolle und eventuellen Korrektur wird hier nach 50 Meßpunkten automatisch die über einen Vergleichstrahlengang gewonnene Signalspannung U_s mit einer sehr gut stabilisierten Referenzspannung U_r verglichen. Über das Potentiometer P_1 (Abb. 43) wird dann im Bedarfsfall die Gesamtempfindlichkeit mit einem Servomotor automatisch auf den vorgegebenen Wert nachgestellt.

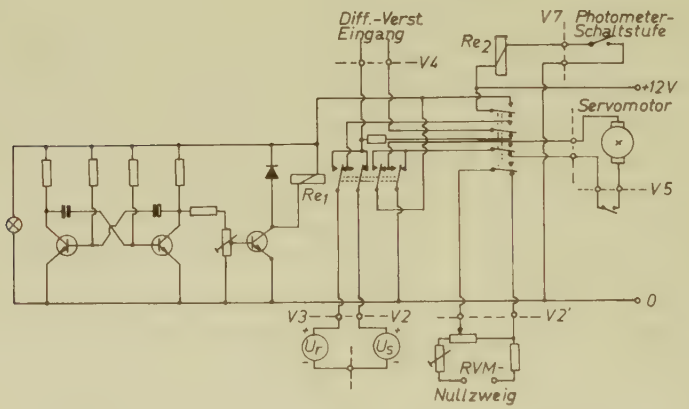


Abb. 44: Meßelektronik: Vergleichsglied Signalspannung-Referenzspannung und Umschaltung der el. Signale

Die in Abb. 44 dargestellt Schaltstufe für die Vergleichsmessung hat drei Funktionen: (1) Sie schaltet den Antriebsmotor für den Photometertisch aus, (2) sie schaltet einen Hubmagnet ein und kippt damit den Umlenkspiegel, der dann den von der Photometerlampe über einen Vergleichsstrahlengang kommenden Lichtstrom auf den SEV leitet (Abb. 38), (3) sie betätigt das in Abb. 44 mit Re_2 bezeichnete Hilfsrelais. Durch dieses Hilfsrelais wird

u.a. die Betriebsspannung an einen astabilen Multivibrator gelegt, der symmetrische Impulse der Dauer 1 sec. liefert und damit das Relais Re_1 mit Einschaltdauer = Ruhepause = 1 sec schaltet (Abb. 44). Auf diese Weise polt das Relais Re_1 periodisch die geringe Differenzspannung $\Delta U = U_s - U_r$ (Signalspannung des Vergleichsstrahlengangs - Referenzspannung) um und gleichzeitig Spannung und Drehrichtung des Servomotors zum Mikropot. P_1 .

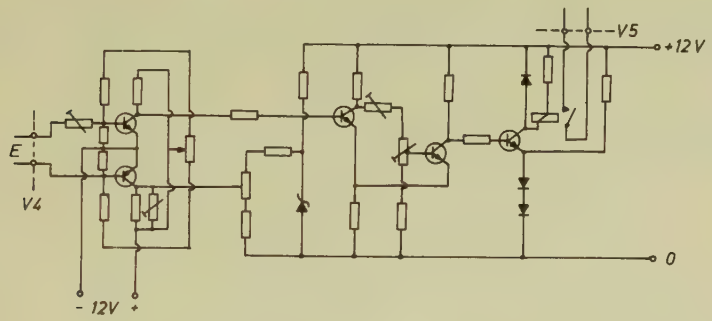


Abb. 45: Meßelektronik: Schaltstufe zum Spannungsvergleich

Der Schaltverstärker zur Auslösung des Nachstellvorgangs ist in Abb. 45 wiedergegeben. Überschreitet die über die Verbindung V_4 am Eingang liegende Spannung ΔU die geringe Schwellspannung $\Delta U_o = + 1.5$ mV , so schaltet das Relais am Ausgang und schließt über die Verbindung V_5 und über Kontaktsätze des Hilfrelais Re_2 (Abb. 44) den Stromkreis zum Servomotor. Das ist je nach Polungsphase bei $U_s > U_r + \Delta U_o$ oder bei $U_s < U_r - \Delta U_o$ der Fall. Durch die Umpolung ist die Drehrichtung des Servomotors stets so gewählt, daß der Schleifer des Mikropot P_1 den Widerstandswert P_1 und damit die SEV-Empfindlichkeit auf eine Verringerung von $|\Delta U|$ hin verändert. P_1 wird solange nachgestellt, bis die Signalsp. U_s im engen Intervall $(U_r - \Delta U_o, U_r + \Delta U_o)$ um die Referenzspannung U_r liegt. Der Schaltverstärker besteht aus einem Differenzverstärker, einer Transistorbrückenschaltung und einem nachfolgenden Schmitt-

Trigger mit Endtransistor zur Relaisschaltung. Die Dimensionierung der Schaltung wurde so vorgenommen, daß bei möglichst geringer Schwellspannung ΔU_o eine möglichst hohe Stabilität und Konstanz gewährleistet ist. Das bedingt u.a. spezielle Auswahl und Einbau des Transistorpaares im Differenzverstärker und temp.-stabilisierte Spannungsversorgung.
Die Gesamteinstellzeit zur Schaltung des Vergleichsstrahlengangs kann über den Widerstand R_1 in Abb. 42 vorgegeben werden. Die max. Einstellzeit reicht bei eingebrannten Geräten aus. Der Einstellbereich des 10-gängigen Mikropotentiometers P_1 in Abb. 43 wird durch ein Zählwerk und eine mit Endlagenschaltern gekoppelte Signallampe kontrolliert (Abb. 46).

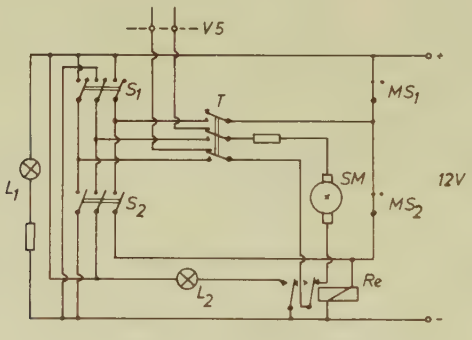


Abb. 46: Meßelektronik: Stellglied der SEV-Empfindlichkeit .
Der Stellmotor SM ist an das 10-gängige Pot. der SEV-Versorgung gekoppelt, S1 und S2 lösen sich mechanisch gegenseitig aus .

Das Zurückstellen in den Arbeitsbereich erfolgt durch Betätigen des Tasters T in Abb. 46 und gleichzeitiger Nachstellung der SEV-Empfindlichkeit über den Außenwiderstand R_a von Abb. 43. Für diesen Fall wird der Vergleichstrahlengang von Hand geschaltet.
Überschreitet das Mikropot P_1 den Arbeitsbereich, so unterbricht einer der Mikroswitchs MS_1 oder MS_2 den Stromkreis des Relais Re und schaltet damit den das Mikropot stark untersetzt stellenden Servomotor SM aus und die Kontrollampe L_2 ein (Abb. 46). Je nach Stellung des Zählwerks (am oberen

oder unteren Ende) kann durch Drücken eines der sich gegenseitig auslösenden Schalter S_1 oder S_2 und Betätigen des Tasters T das Mikropot. wieder in den Arbeitsbereich zurückgebracht werden. Die Schaltung ist so ausgelegt, daß bei Drücken des "falschen" Schalters S_1 bzw. S_2 der Motor nicht weiterläuft, sondern nur der jeweils richtige Druckschalter den Servomotor SM schaltet.

Die Lampe L_1 in Abb. 46 zeigt an, daß der Vergleichsstrahlengang eingeschaltet ist. Die Verbindung V_5 führt zum Schaltverstärker (Abb. 45) und der Umschaltstufe (Abb. 44) bei freiem Taster T direkt zum Servomotor SM.

Die Spannungsversorgung der beschriebenen elektronischen Schaltungen erfolgt entsprechend deren tragbarer Schwankungsbreiten hinsichtlich Schwankungen der Netzspannung, Änderungen der Ausgangsbelastung und der Betriebstemperatur hoch stabilisiert. Die verbleibenden Abweichungen der am Schreiber registrierten Meßwerte sind in Bezug auf dessen Ablesegenauigkeit unbedeutend.

4. Meßverfahren und Auswertung

Zunächst wird der Photometertisch mit der zu vermessenden Filmprobe genau in die abzubildende Objektebene gebracht. Die Scharfeinstellung der Filmebene auf eine anstelle der Meßlochblende in den Strahlengang eingebrachte Mattscheibe kann über einen Einblick (Abb. 36) geprüft werden. Das Verlaufsfilter im Vergleichsstrahlengang wird darauf so eingestellt, daß der SEV bei mittlerer Stellung des 10-gängigen Nachstellpotentiometers und geschaltetem Vergleichsstrahlengang etwa dieselbe Intensität erhält wie im Mittel durch den Meßstrahlengang. Nach Einstellung der Endlagenschalter zum Wagenvorschub (Fixierung der Meßstrecke) und Einstellung des für die zu messende Intensitätsschwankung günstigen Bereichs (entspr. S. 85) läuft nach Start des Wagenvorschubs der Meßvorgang automatisch ab und die digitalen Meßwerte werden vom Schreiber registriert. In diese Messung geht der Abtastbereich, bestimmt durch Einschubmeßblende und Abbildungsmaßstab, ein. Die verwendete Lochblende ergibt eine kreisförmige Abtastöffnung von 20 μ Ø in der Filmebene. Nach jedem Meßpunkt wird der Film um 20 μ verschoben.

Die Meßdaten wurden vom Schreiber abgelesen und auf Lochkarten übertragen. Die Auswertung der Meßdaten erfolgte an der TR4 der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Eine direkte Umsetzung der Daten auf Computer-Eingangsmedien würde natürlich den Nutzen der Photometeranordnung erst richtig zur Geltung bringen.

Die Abtastmethode hat gewissen Einfluß auf die registrierten Daten. Nach Gl. (62) kann der Ausdruck $|M(v)|^2$ der Photometerabbildung als Filterfunktion des Objekt-Wienerspektrums betrachtet werden. Werden die Dimensionen auf die Filmebene bezogen, so folgt für die MÜF der "Lochblende" mit 20μ Ø

$$M(v) = \frac{2 \cdot J_1(0.02\pi v)}{0.02\pi v} .$$

Die MÜF des abbildenden Mikroobjektivs kann in diesem Frequenzbereich als identisch 1 betrachtet werden.

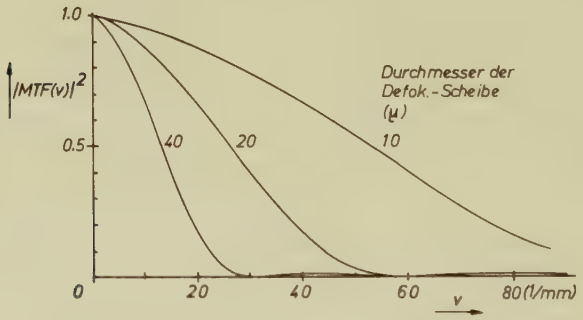


Abb. 47: Filterfunktionen $|MTF(v)|^2$ entspr. Defokussierungsscheiben von 10, 20, 40μ Ø, errechnet über Besselfunktionen bei idealer MÜF des Abbildungssystems .

Denkt man sich anstelle der Meßlochblende eine sehr enge Lochblende, so erfasst das Mikroobjektiv bei linearer Defokussierung der Objektebene um dx und ausgenutzter numerischer Apertur NA einen Kreisbereich vom Radius R = NA·dx. Die entsprechende Übertragungsfunktion kann leicht entspr. Gl. (66) errechnet werden, wobei die Filterfunktionen $|M(v)|^2$ für 2R = 10, 20, 40μ

in Abb. 47 dargestellt sind. Die resultierenden Filterfunktionen $|M(v)|^2$ bei einer Meßlochblende von 20 μ Ø und Defokussierungen der Filmebene von 0, 5, 10, 20, 40 μØ sind in Abb. 48 wiedergegeben.

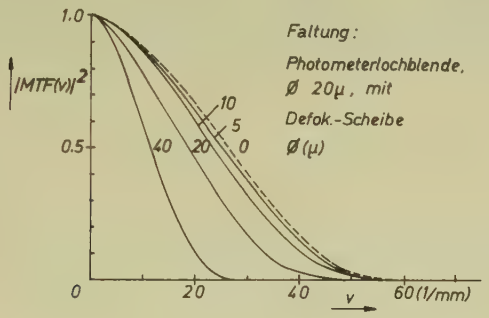


Abb. 43: Filterfunktionen $|MTF(v)|^2$ entspr. Faltungen von Defokussierungsscheiben (0, 5, 10, 20, 40 μ Ø) mit der Photometerlochblende (20 μ Ø).

Die Auswirkung einer Defokussierung auf die gemessenen Varianzwerte σ^2 lässt sich nach Formel (79) ebenfalls leicht errechnen. Unter der Annahme weißen Eingangsrauschens ergeben die Volumina der durch Rotation der Filterfunktionen um die Ordinatenachse entstandenen Körper ein Maß für die Varianzwerte σ^2. In Abb. 49 ist die Varianz σ^2 in Abhängigkeit vom Durchmesser 2R der Defokussierungsscheibe bei einer Abtastöffnung von 20 μ Ø wiedergegeben. Die als Kreise eingezeichneten Werte sind eigene Kontrollmessungen an der verwendeten Apparatur, wobei die lineare Defokussierung dx der Objektebene den Durchmesser 2R = 0.16 dx ergibt.

Aus den Abbildungen 48 und 49 geht hervor, daß beim gegebenen System die Auswirkungen einer kleinen Defokussierung noch gering sind, während bei kleineren Abtastöffnungen und damit breiteren Filterfunktionen auch kleine Abweichungen der Filmlage von der Sollage deutliche Änderungen der $|M(v)|^2$-Funktionen und der Autokorrelationsfunktionen ergeben.

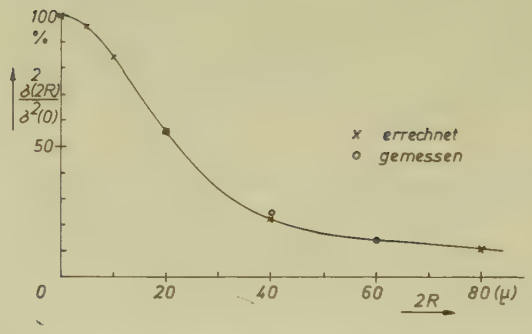
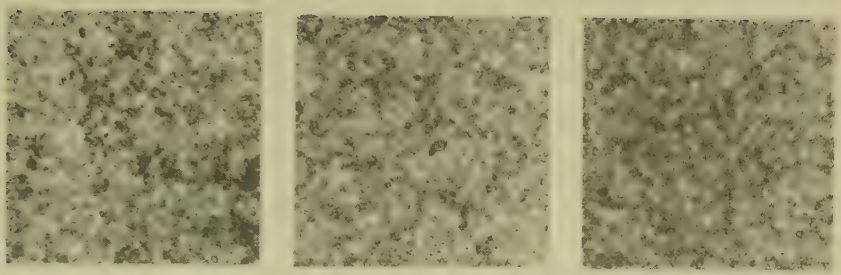


Abb. 49: Relative Änderungen der Varianzwerte σ^2 durch Defokussierung der Abtastlochblende (20μ Ø) in Abhängigkeit vom Durchmesser 2R der Defokussierungsscheibe, errechnet für weißes Eingangsrauschen. Die eingezeichneten Kontrollwerte wurden an der verwendeten Apparatur ermittelt .

5. Messungen an den Rauschstrukturen des Schirmbildsystems

Mit der beschriebenen Photometeranordnung wurden Daten zur Kennzeichnung der in den Schirmbildanordnungen auftretenden Rauschstrukturen ermittelt. Aufnahmen der 15 verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen wurden vermessen, ebenso Aufnahmen der reinen Filmstruktur und vergrößerte Aufnahmen der Leuchtschirmstrukturen. Insgesamt wurden über 80 000 Einzelwerte in etwa 100 Serien registriert und ausgewertet. Dabei hat sich die oben beschriebene Photometeranordnung zur automatischen Registrierung des Transparenzverlaufs von Filmproben als Digitalwert-Folge sehr gut bewährt.

Die Struktur der Leuchtschirme (Abb. 50) wurde in einem nach außen lichtdichten Kasten 1:10 vergrößert auf Schirmbildfilm Nr. 4 abgebildet und die phot. Aufnahmen mit obiger Photometeranordnung ausgewertet. Die Anordnung bestand aus einer Halterung für Proben der Schirme H,N,S, einem Mikroobjektiv (Leitz 1:10/0.16), einem 45°-Oberflächenspiegel zur Umlenkung des Strahlengangs aus dem Bereich des Röntgenkegels und einem Kameragehäuse zur Führung des Films.



H N S

H 100µ

Abb. 50: Vergrößerte Schirmstrukturen der verwendeten Leuchtschirme H,N,S

Die Aufnahmen wurden unter den üblichen Bedingungen (110 kV etc.) durchgeführt, die Filme wurden auf Gradation 1 entwickelt. Die auszuwertenden Bilder wurden aus eng gestaffelten Defokussierungsreihen ausgewählt.
Da benachbarte Bereiche des Films von 20µ Ø nur noch sehr gering korreliert sind, eingehender darüber weiter unten, können die erhaltenen Periodogramme der Schirmstrukturen durch Extrapolation der Funktionswerte für Schrittweite P→O bzgl. der Filmeigenstruktur korrigiert werden. Der Abtastbereich des Photometers von 20µ Ø wirkt bzgl. der vergrößerten Leuchtschirmstruktur nicht begrenzend, sodaß die in folgenden dargestellten Autokorrelationsfunktionen die Schirme unter den gegebenen Aufnahmebedingungen kennzeichnen. Die direkt vergrößerten Schirmstrukturen wurden anhand von Datenfolgen entsprechend einer linearen Photometerspur ausgewertet. Dabei zeigte sich, daß sich die Periodogramme, erhalten durch Auswertung der Gesamtdatenfolge, von den Periodogrammen unterscheiden, die durch Aufteilung der Gesamtfolge in Teilfolgen und entsprechende Mitteilung erhalten werden. Teilt man z.B. die Datenfolgen in Teilfolgen zu je 200 Punkten, entsprechend 400µ in der Schirmebene, so geben die erhaltenen gemittelten Periodogramme im wesentlichen die Kornstruktur, bzw. die Eigenschaften des Einzelkorns wieder. Im Gegensatz dazu kommt bei Teilfolgen von 1000 Punkten, entsprechend 2 mm in der Schirmebene, die Schwankung größerer Bereiche, z.B. bedingt durch ungleichmäßige Beschichtung, zum Tragen. Als Folge

davon werden i.a. die Periodogramme breiter, die Aufnahmen zeigen Korrelationen in größeren Bereichen. Schließlich entscheiden die praktischen Anforderungen, welche Art der Auswertung gewählt wird:
Je nach Größe des vom System, z.B. vom Auge bei Fixierung eines Objektes, auf einmal erfassten Bereiches sollten Teilfolgenlänge und Abtastbereich gewählt sein.
Zunächst interessiert die Kornstruktur der Leuchtschirme. Die entsprechenden Periodogramme der Schirme H,N,S wurden über Teilfolgen zu je 200 Punkten errechnet. In Abb. 51 sind die gemittelten Kurven dargestellt.

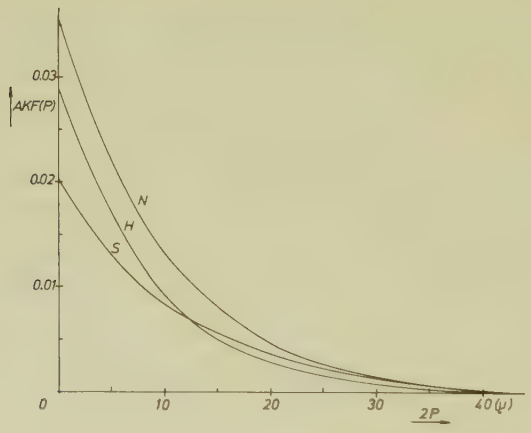


Abb. 51: Autokorrelationsfunktionen der Leuchtschirmstrukturen, gemessen an 10-fachen Direktvergrößerungen der Schirme H,N,S .

Wie auch anhand der in Abb. 50 wiedergegebenen vergrößerten Schirmstrukturen direkt ersichtlich, dürfte die Materialkörnung der drei Schirme ähnlich sein, die Korrelationslängen der Schirme (Abb. 51) unterscheiden sich nur wenig, sie liegen um 40 μ . Die Abtastöffnung des Photometers (2 μ Ø bzgl. Schirmebene) beeinflusst den Verlauf der Periodogramme praktisch nicht, die dargestellten Kurven können als Autokorrelationsfunktionen der Teilbereiche betrachtet werden. Vergleicht man diese Funktionen mit den Autokorrelationsfunktionen phot. Modellschichten (O' NEILL), so folgt für die Schirme ein

mittlerer Korndurchmesser von etwa 50 μ . In den folgenden Überlegungen werden die unten ermittelten δ -Werte der Schirm-Film-Strukturen verwendet, die für die Schwellenmessungen verwendet und deshalb entscheidend sind.

Die ausgemessenen Rauschstrukturen von Aufnahmen der 15 verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen wurden ebenfalls mit Computerprogrammen als Periodogramme A(p) ausgewertet. Ein Vergleich der resultierenden Funktionen A(p) untereinander ergab einheitlich einen steilen Abfall der Werte A(p) für p=1,2,3 etc. Betrachtet man zunächst nur den rel. Verlauf $A(p)' = A(p)/A(0)$, so beträgt der statistische Fehler $\Delta A(p)' \approx \pm 2 / \sqrt{n}$, das doppelte des statistischen Fehlers bei Bestimmung des Mittelwertes aus der Serie von n Meßpunkten. Um diesen Fehler klein zu halten und damit eine sinnvolle Aussage für den Verlauf von A(p)' zu gewährleisten, wurde n durch Zusammenfassung der Filmserien erhöht. Die entsprechenden Werte für A(p)' sind in der folgenden Tabelle angeführt:

A(p)'	p: 0	1	2	3
H:	1.00	0.10	0.06	0.03
N:	1.00	0.105	0.04	0.025
S:	1.00	0.125	0.065	0.035

Innerhalb der statistischen Fehler $\Delta A(p)'$ stimmen die Werte A(p)' der Schirme H,N,S überein. Das bedeutet , daß bei einem Abtastbereich von 20 μ Ø in der Filmebene und ebensolcher Schrittweite (entsprechend 120 μ Ø in der Schirmebene) im Mittel nur geringe Korrelationen auf diese Distanzen bestehen. Die ähnliche Größenverteilung der Schirmkörner und das Punktbild von Abbildungsoptik und Film (Abb. 25) bewirken außerdem eine Nivellierung der A(p)' - Werte verschiedener Schirme.

In der folgenden Tabelle sind Streuungswerte $\sigma = \sqrt{A(0)}$ der verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen bzgl. des Abtastbereichs von 20 μ Ø wiedergegeben:

σ		Leuchtschirm H	N	S
Film Nr.:	1	.235	.215	.23
	2	.24	.24	.23
	3	.14	.14	.145
	4	.175	.175	.185
	5	.13	.13	.145

Für die Erkennbarkeit von Objektstrukturen der linearen Ausdehnung von 500 - 5000 μ (in der Schirmebene gemessen) dürften auch Rauschstrukturen, die auf größere Abtastbereiche bezogen sind, von Einfluß sein. Aus praktischen Gründen, die digitalen Transparenzfolgen der Rauschstrukturen lagen bereits von den A(p) - Berechnungen in Lochkartenform vor, wurde nicht der Photometerabtastbereich von 20 μ Ø direkt vergrößert, sondern im Computerprogramm jeweils lineare Folgen von m Meßpunkten zusammengefasst und für diese Abtastbereiche von $m * 1$ (entsor. $m * 100\pi\ \mu^2$) die Streuungswerte $\sigma(m)$ errechnet.

In Abb. 52 ist der Verlauf der rel. Werte $\sigma(m)/\sigma(1)$ in Abhängigkeit von der linearen Ausdehnung m des Bereichs zusammengefasst für die drei Schirme H,N,S im doppeltlog. Maßstab dargestellt. Daneben ist die zu erwartende Kurve bei völlig unkorrelierten Bereichen, entsprechend der Beziehung $\sigma(m) \cdot \sqrt{m} = \text{konst.}$, zum Vergleich wiedergegeben.

Während die Kurven für die Schirme H,N,S bis m=4 praktisch gleich verlaufen, spaltet die Kurve S für größere m von den eng benachbarten Kurven H und N ab und geht schließlich wie diese bei hohen Werten m in eine Parallele zur Kurve der unkorrelierten Bereiche über. Dort gilt dann (jeweils bereichsweise) ebenfalls statistische Unabhängigkeit benachbarter Abtastbereiche $m * 1$. Dieser Verlauf gilt mindestens ebenso stark für flächenhafte Betrachtung.

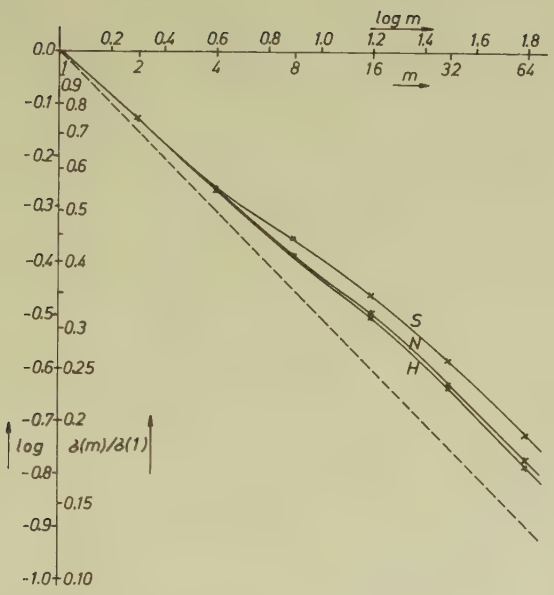


Abb. 52: Relativer Verlauf der Streuungswerte $\delta(m) / \delta(1)$ in Abhängigkeit von der Ausdehnung m des Abtastbereichs (m * 1 Meßpunkte) für Aufnahmen der Schirme H,N,S und Vergleich zu völlig unkorrelierten Bereichen .

Während nun in der Tabelle der Streuungswerte $\delta(1)$ die Aufnahmen mit Schirm S Werte lieferten, die im Rahmen der Meßgenauigkeit bei oder knapp über den δ-Werten der Schirme H und N liegen, gibt Abb. 52 den Hinweis auf deutlich größere δ-Werte für Aufnahmen mit Schirm S bei größeren Abtastbereichen.

Die Untersuchungen an reinen Filmstrukturen ergaben bei einem Abtastbereich von 20μ Ø Streuungswerte δ, die angesichts der statistischen Genauigkeit der Werte knapp unterhalb der jeweils in der Tabelle auf Seite 96 angegebenen Daten liegen.

Die gegenüber den Schirmen H,N erhöhten δ-Werte des Schirms S bei größeren Bereichen in Verbindung mit dem signifikant stärker empfundenen Rauschen der Strukturen mit Schirm S bedingen eine im Schirm selbst oder

in der Quantennatur der Röntgenstrahlung liegende Ursache. In der Literatur wird der Einfluß der Schirmstrukturierung ("mottle") auf das Systemrauschen als gering angesetzt gegenüber dem Einfluß der Quantenrauschens (ROSSMANN). Im folgenden soll untersucht werden, ob das stärkere Systemrauschen mit Schirm S gegenüber dem Systemrauschen mit den Schirmen H oder N auf ein höheres Quantenrauschen N_s gegenüber N_h und N_n zurückgeführt werden kann. Bekanntlich beträgt beim Poisson-Rauschen, wie es das Quantenrauschen darstellt, bei einer auf eine Integrationsfläche a bezogenen Gesamtquantenzahl n_a die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{n_a}$, damit der rel. Wert $N = 1/\sqrt{n_a}$.

Sämtliche Phantomaufnahmen wurden auf konstante Schwärzung hin belichtet und unter gleichen Bedingungen entwickelt. Für einen bestimmten Film muß deshalb die unterschiedliche Röntgen-Quantenabsorption der Schirme H,N,S (47%, 30%, 20%) durch entsprechende Belichtungszeit (unter sonst konstanten Bedingungen) ausgeglichen werden. Infolge des Schwarzschildeffekts wird die vom weniger empfindlichen Schirm S kommende, über die Belichtungszeit t summierte Quantendichte n_s höher sein als bei Schirm N oder gar Schirm H : Beschreibt man die für die Schwärzung S = S(B) erforderliche Belichtungsgröße durch $B = I \cdot t^p$, so nimmt p(t) mit steigendem t ab. Für konstantes, erforderliches B steigt deshalb die Größe $I \cdot t \sim n$ mit zunehmendem t , d.h., aus $t_h < t_n < t_s$ bei B=konst. folgt $n_s > n_n > n_h$.

Als Umsetzungsfaktor kann für die Schirme angesetzt werden: 5000 Lichtquanten/abs. Röntgenquant. (TEVES,TOL). Eine Differenzierung der Schirme durch einen Unterschied in den Umsetzungsfaktoren und stärkere verschiedene Eigenabsorption der Lichtquanten kann durch Vergleich der oben angeführten Zahlen der rel. Schirmempfindlichkeiten und der Absorption der Röntgenstrahlen ausgeschlossen werden. Die summierten Röntgenquanten-Dichtewerte n sind um den Faktor 5000 geringer, d.h., das Quantenrauschen wird allgemein um den Faktor $\sqrt{5000} \approx 71$ erhöht. Aber auch in diesem Bereich werden durch die unterschiedlichen Absorptionsanteile der Schirme die Quantendichten noch weiter differenziert: $n_s > n_n > n_h$, so daß stets gilt: $N_s > N_n > N_h$. Das Quantenrauschen nimmt daher in der Reihenfolge der Schirme H,N,S ab, die Quantennatur der Röntgenstrahlung scheidet als

Ursache des verstärkten Systemrauschens bei Schirm S aus.

Als Ursache für das stärkere Rauschen des Schirms S gegenüber N und H bleibt eine höhere statistische Variation der Flächendichte von Schirm S, durch die geringe Schichtdicke von 190 μ beeinflusst. Bei Direktbetrachtung der Schirmoberfläche zeigt sich diese Ungleichmäßigkeit schwach, verstärkt ist sie sichtbar auf den auf Schirmmaßstab vergrößerten Phantomaufnahmen (Abb. 53). Als Größenordnung der Strukturen kann 1 - 2 mm bzgl. der Schirmebene angegeben werden.

D. Ergebnisse der Schwellenmessungen und Vergleich mit Berechnungen und objektiven Messungen

I. Subjektive Messungen mittels der Testapparatur

Die Kennzeichnung der verschiedenen Schirmbildsysteme durch Messungen der Erkennbarkeitsschwellen verschiedener Landoltringgrößen wurde mit Hilfe der auf Seite 47 beschriebenen Testanordnung durchgeführt. Dabei wurden sowohl die 15 Schirmbildsysteme insgesamt als auch der Einfluß der entsprechenden Rauschstrukturen auf die Schwellerkennbarkeit getestet.

I. 1. Erkennbarkeitsfunktionen der Röntgen-Schirmbildsysteme

Die Testdias der 15 Schirm-Film-Kombinationen mit einer mittleren Gesamtschwärzung von 1.2 wurden bei einer Leuchtdichte von 60 asb projiziert und Beobachtern im Abstand von 40 cm dargeboten. Während einer Testsitzung wurde jeweils eine Serie statistisch geordnet betrachtet und die matrixartige Ringanordnung (Abb. 53) zeilenweise auf die Stellung der Ringschlitze abgesucht. Die angegebenen Ringstellungen wurden schließlich sämtlich mit den tatsächlichen Stellungen, die für jede Aufnahme verändert und fixiert worden waren, verglichen. Aus insgesamt über 60 000 Einzelaussagen von 170 Testdias wurde für jede Schirm-Film-Kombination und Ringklasse die relative Anzahl der Richtig-Aussagen mit wachsender Ringdicke ermittelt. Der Beobachter konnte auf die Frage nach der Stellung des jeweiligen Ringschlitzes auch die Antwort "nicht erkannt" geben. Diese Methode ist an der Praxis orientiert sinnvoller als die Methode, bei jedem Ring die Angabe einer Orientierung zu fordern, wenigstens in der Röntgendiagnostik, bei der auch die Falschalarmrate gering sein soll.
Die Stellung der Ringschlitze war auf die 4 Hauptrichtungen festgelegt, die Ratewahrscheinlichkeit betrug danach 1/4. Anhand der festgestellten Falschaussagen für jeden Ring kann daraus der Anteil geratener Aussagen abgeschätzt werden. Die um diesen Anteil korrigierten richtigen Aussagen ergeben die echte Signalerkennbarkeit, in Form der Erkennbarkeitsraten E(d).

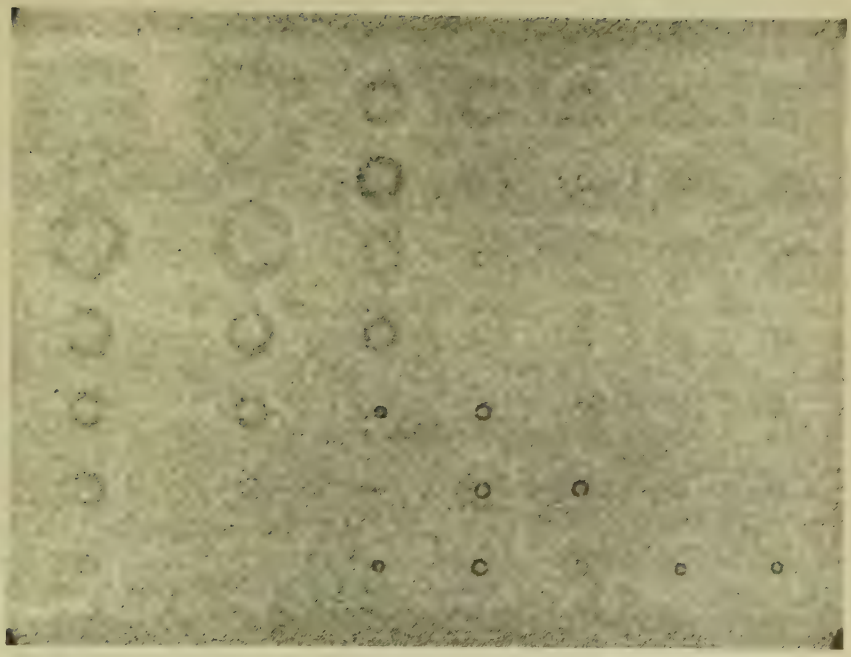


Abb. 53: Vergrößerte Schirmbildaufnahme des Röntgenphantoms .

Zur Ermittlung der Ringdicken pro Ringklasse, für die 50 % richtige Aussagen (bei eliminierten Rateaussagen) zu erwarten sind, wurde anhand der Werte E(d) über einen Bereich ($d_1 \ldots d_2$) summiert: $d' = \sum_{d_1}^{d_2} E(d) \cdot \Delta d$, wobei gilt: $E(d_1) = 0\%$, $E(d_2) = 100\%$. Der Wert $d_{50\%} = d_2 - d'$ gibt dann bei symmetrischer Verteilungsfunktion die Ringdicke für 50% richtige Aussagen. Die Dickenverteilung der Ringklassen war weitgehend äquidistant und eng gestaffelt bei guter Symmetrie der Verteilungsfunktionen. Die erreichte Genauigkeit des Testverfahrens konnte durch Vergleich der von zwei verschiedenen Beobachtergruppen erzielten Ergebnisse nachgeprüft werden: Auch bei sehr kleinen Unterschieden zweier Ringklassen in $d_{50\%}$ waren die Ergebnisse der beiden Gruppen in guter Übereinstimmung.

In Abb. 54 sind die erhaltenen Erkennbarkeitsfunktionen $d_{50\%}$ in Abhängigkeit von der Schlitzbreite s für die einzelnen Schirm-Film-Kombinationen + Gesamtübertragungssystem dargestellt.

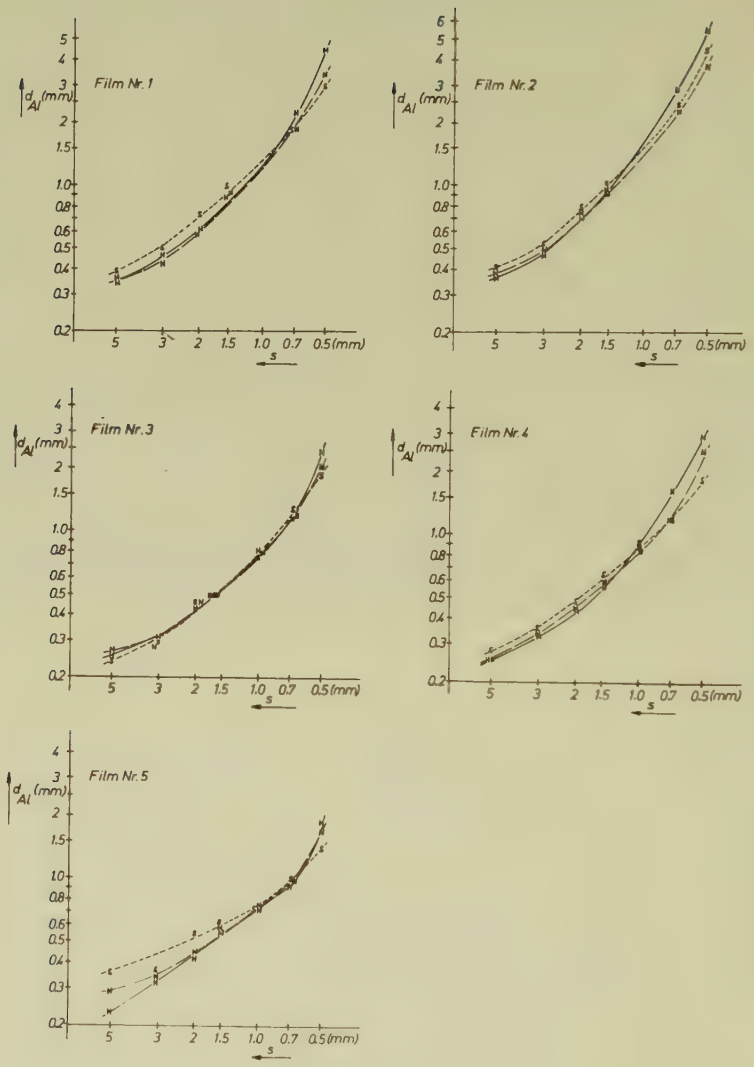


Abb. 54: Erkennbarkeitsfunktionen der verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen: Ringdicke d_{Al} (mm) zur 50 %-Erkennbarkeit für Ringschlitze von s = 0.5 ... 5 (mm) .

Bei sämtlichen Kurven der Abb. 54 nimmt die für 50% Erkennbarkeit notwendige Ringdicke d mit abnehmender Schlitzbreite s wie zu erwarten ab. Dabei zeigt sich bei praktisch allen Filmen für große Details eine Überlegenheit der Schirme H und N gegenüber Schirm S. Bei kleinen Details sind die Verhältnisse gerade umgekehrt. Für die MÜF und Punktbilder der verschiedenen Schirme wurde oben festgestellt, daß die Qualität der Schirme in der Reihenfolge S,N,H abnimmt. Dagegen zeigte die psychophysische Wertung der Rauschstrukturen Schirm-Film bei sämtlichen Schirmen ein wesentlich stärker empfundenes Rauschen von Schirm S gegenüber den Schirmen H und N. Bei den feinkörnigeren Filmen wurde Schirm N stärker bewertet als Schirm H, bei den grobkörnigen Filmen wurde das Rauschen von Schirm H gegenüber Schirm N stärker bewertet. Die objektiven Auswertungen der Rauschstrukturen mit der Photometeranordnung ergaben bei Abtastbereichen von 120μ Ø (bzgl. der Schirmebene) Streuungswerte σ, die für Schirm S geringfügig größer gegenüber den Schirmen H und N waren. Der Übergang zu größeren Abtastbereichen zeigte jedoch ein deutliches Anwachsen der entsprechenden σ-Werte zu Schirm S gegenüber den Schirmen H und N. Damit erweist sich das schlechtere Abschneiden von Schirm H bei kleinen Objektdetails s als Folge der wesentlich schlechteren Abbildung durch Schirm H gegenüber den anderen Schirmen. Die in Abb. 27 wiedergegebenen Bildverteilungen der verschiedenen Landoltringgrößen durch die Schirm-Film-Kombinationen verdeutlicht die rein abbildende Wirkung der Schirme. Mit zunehmender Ringgröße kommt das stärkere Rauschen bei größeren Abtastbereichen gegenüber dem schwächer werdenden Einfluß der verschiedenen Schirmpunktbilder zum Tragen und ist die Ursache für den geringeren Schwellenwert der Schirme H und N gegenüber Schirm S. Vergleicht man damit die stark unterschiedliche reziproke Empfindlichkeit der Schirme, ausgedrückt in Patientendosis zur Erlangung einer bestimmten mittleren Filmschwärzung, nach Seite 31 verhalten sich die Schirme H:N:S wie 1:1.6:2.4 , so folgt für gröbere interessierende Details eine Überlegenheit von Schirm H gegenüber den beiden anderen Schirmen. Erst bei Details in der Größe 0.5 mm ist Schirm H unterlegen. Dabei ist noch zu beachten, daß die für s = 0.5 mm notwendige Objektdicke (bei Aluminium als Test-

material je nach Film: 1.5 ... 4 mm) in praktischen Fällen bereits prinzipiell kaum auftreten dürfte. Damit wird das Verhalten der Schirme für größere Objektdetails ausschlaggebend.

Die fünf verschiedenen Schirmbildfilme weisen vorallem aufgrund ihrer verschiedenen Empfindlichkeit, zusammenhängend die damit verschieden starken Rauschstrukturen (gemessen als Streuungswert) starken Einfluß auf das Niveau der Erkennbarkeitsfunktionen auf. Vergleicht man die Niveaus der Erkennbarkeitsfunktionen im Größenbereich s: 0.7...2 mm mit rel. Intensitätswerten zur Erreichung der mittleren Schwärzung 1 (siehe Tabelle S. 36), so erweist sich Film Nr. 4 als günstig. Gegenüber Film Nr. 1 und 2 bietet er eine erheblich bessere Schwellenerkennbarkeit, gegenüber Film Nr. 3 und 5 eine höhere Empfindlichkeit.

I. 2. Erkennbarkeitsfunktionen von Landoltringen mit und ohne unterlegte Rauschstrukturen der Schirmbildsysteme

Unter den gleichen Bedingungen wie in Kap.D.I.1 - mittlere Schirmleuchtdichte 60 asb, Betrachtungsabstand 40 cm - wurden 50%-Erkennbarkeitstests für Landoltringe vom Durchmesser 2.5 bis 25 (mm), entsprechend Schlitzbreiten s von 0.5 bis 5 (mm), mit und ohne unterlegte Rauschstrukturen durchgeführt. Als Rauschstrukturen wurden reine Untergrundstrukturen der 15 verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen mit der in Kap. B.II.1 beschriebenen Aufnahmeanordnung hergestellt. Zusätzlich wurden mit derselben Anordnung und Ersetzen der Röntgenabbildung mit Leuchtschirm durch einen Leuchtkasten mit Grünfilter lichtoptisch Strukturen der 5 verwendeten Filme gewonnen. Diese Aufnahmen wurden entsprechend Kap. B.II.5 entwickelt und die erhaltenen Dias von der Beobachterseite her auf einen Spezialschirm der Größe 13 x 18 cm^2 der Testanordnung (Kap. B.II.6) projiziert, während diese Testanordnung selbst über den automatischen Projektor Landoltringe als Schwellensignale überlagerte und das Umfeld lieferte. Anstelle der normalen Projektionslampe war der Testzeichenprojektor mit einer Sofittenlampe bestückt, wobei dem Lampenstrom wiederholt die effektive Schirm-

leuchtdichte meßtechnisch zugeordnet wurde. Die Testprozedur war nun folgende: Beginnend mit unterschwelligen Werten der Signalleuchtdichte wurde ein Satz nach Größe und Richtung statistisch folgender Landoltring-dias dargeboten, während die Rauschstruktur auf den Schirm scharfgestellt und auf eine mittlere Leuchtdichte von 60 asb gebracht wurde. Mit in Intervallen steigender Signalleuchtdichte und veränderter Ringfolge wurden einem Beobachter, der eine Aussage über die Stellung des Ringschlitzes machte, diese Tests dargeboten. Die Auswertung dieser Daten ergab entsprechende 50%-Erkennbarkeitsschwellen. Insgesamt wurden über 12 000 Einzelaussagen erfasst und ausgewertet. In Abb. 55 sind diese relativen Schwellen $\Delta B/B$ bei strukturlosem Untergrund und Schirm-Film-Rauschstrukturen der mittleren Leuchtdichte B = 60 asb dargestellt. Vergleicht man zunächst den Einfluß der verschiedenen Leuchtschirme, so fällt auf, daß Schirm S eine wesentlich höhere Schwelle bei Film Nr. 3, 4, 5 gegenüber H,N erfordert. Diese Filme zeigen auch wesentlich geringere Streuungswerte σ der Rauschstruktur gegenüber Nr. 1 und 2. Deshalb wirkt sich der Unterschied der Schirme dabei besonders aus. Die Schirme H und N bewirken nur geringe Unterschiede der Schwellenwerte, bei einer etwas geringeren Schwelle $\Delta B/B$ von Schirm H. Die Kurven der reinen Filmstrukturen liegen erwartungsgemäß unter den Kurven der kombinierten Rauschstrukturen, hierbei besonders deutlich bei den Filmen mit geringeren Streuungswerten σ der Filmstruktur.

Aus den Schwellenkurven mit Rauschuntergrund $\Delta B_+/B$ und der Schwellenkurve $\Delta B/B$ für strukturlosen Untergrund bei identischer mittlerer Leuchtdichte B = 60 asb lassen sich entsprechende Quotienten $\Delta B_+/\Delta B$, in Abb. 56 dargestellt, bilden.
Diese relative Schwellen geben den Faktor an, um den das 50%-Schwellensignal (ohne Rauschen) erhöht werden muß, um mit unterlegter Rauschstruktur wieder dieselbe Erkennbarkeitsquote zu ergeben. Die Quotienten $\Delta B_+ / \Delta B$ geben die Bewertung des Beobachters für die dem Signal unterlegte Rauschstruktur wieder.

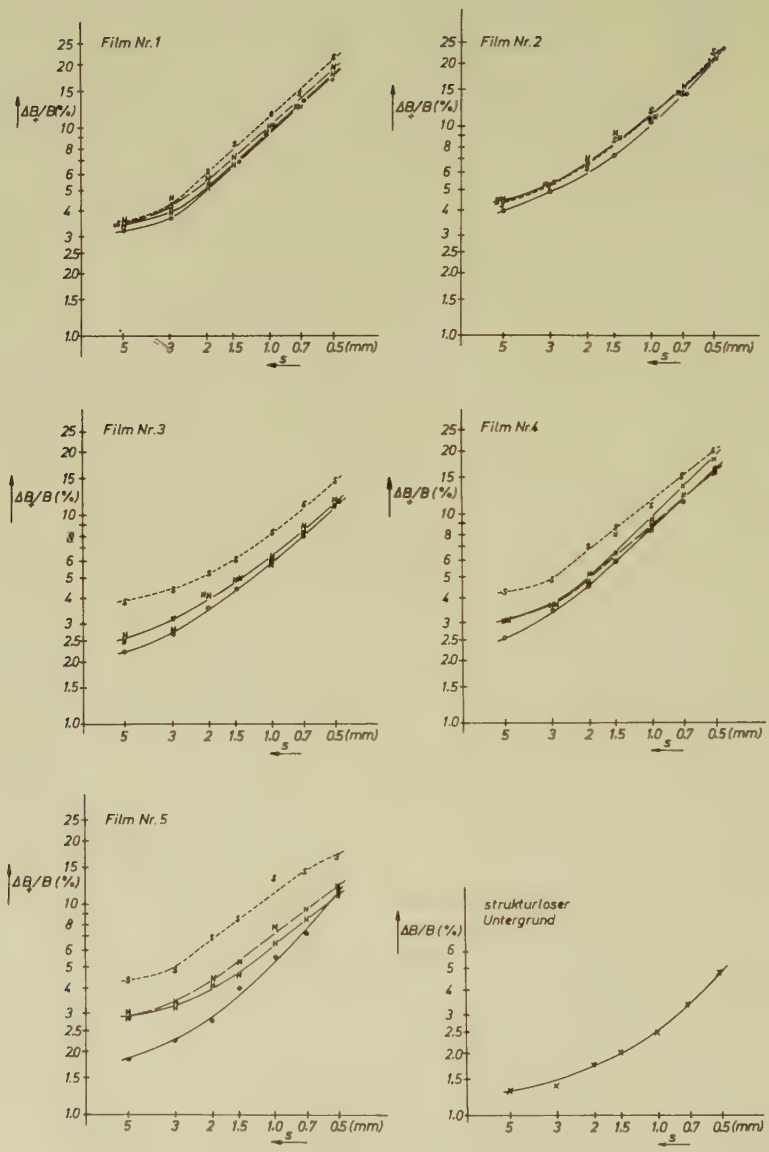


Abb. 55: Schwellen der 50 %-Erkennbarkeit von Landoltringen der Spaltbreiten s = 0.5 ... 5 (mm) bei Rauschstrukturen der Filme Nr. 1 - 5 allein (o) und mit Schirmstrukturen (H,N,S) und bei strukturlosem Untergrund (x) . Mittlere Leuchtdichte: 60 asb .

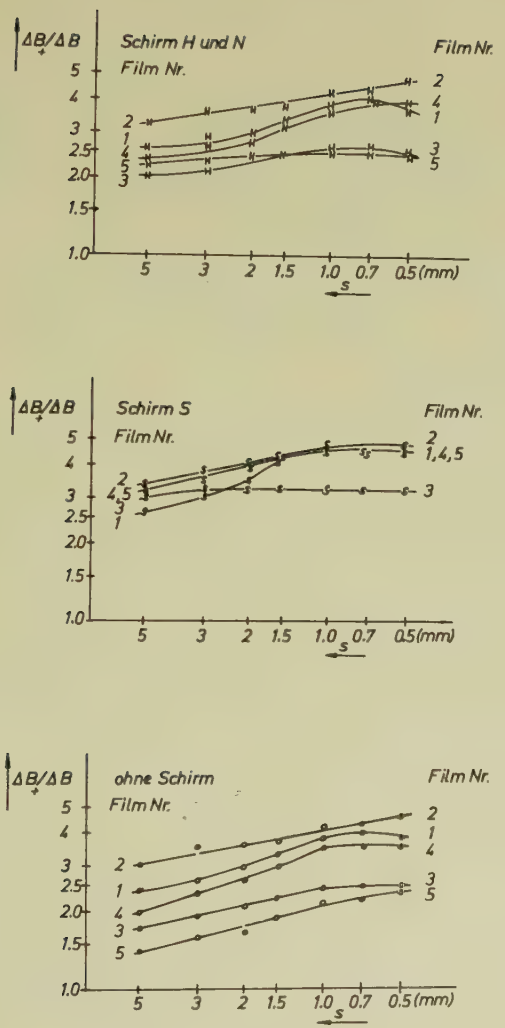


Abb. 56: Relative Schwellenfunktionen: 50 %-Erkennbarkeitsfunktionen $\Delta B / B$ mit unterlegten Rauschstrukturen / 50 %-Erkennbarkeitsfunktionen $\Delta B/B$ bei strukturlosem Untergrund . Leuchtdichte: 60 asb .

Mit abnehmendem Signaldurchmesser s nehmen die Funktionswerte monoton zu, bzw. nähern sich einem Sättigungswert. Die verwendeten Rauschstrukturen sind also umso "störender", je kleiner der Signaldurchmesser und damit der "Samplingbereich" des Auges ist. Während die reinen Filmstrukturen als Rauschuntergrund entsprechend ihren unterschiedlichen Streuungswerten σ eine breite Fächerung der Ordinatenwerte zeigen, bringt die zusätzliche Schirmstruktur eine Anhebung und Einengung des Bereichs. Im Bereich kleiner Details (0.5 mm Schlitzbreite) bringt die zusätzliche Schirmstruktur H (bzw. N) keine nennenswerte Veränderung gegenüber der reinen Filmstruktur, wohl aber im Bereich gröberer Strukturen (5mm Schlitzbreite) : die Werte $\Delta B_+ / \Delta B$ liegen ohne Schirm zwischen 1.4 und 3.0 , während Schirm H und N eine Verschiebung und Einengung auf 2.0 bis 3.2 ergeben.
Die entsprechende Darstellung für die Schirmstruktur S in Abb. 56 zeigt in noch stärkerem Maße eine Nivellierung der Kurven, entsprechend einer Einengung des Bereichs und einer Anhebung der unteren Kurven: bei 5 mm Schlitzbreite gehen die Werte $\Delta B_+ / \Delta B$ von 2.6 bis 3.3 und bei 0.5 mm Schlitzbreite von 3.2bis 4.6 . In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der psychophysischen Messungen auf Seite 69 und den Messungen des Streuungswertes mit zunehmender Abtastfläche zeigt Schirm S stärkere Rauschstrukturen als die beiden Schirme H und N.

I. 3. Subjektive Kennzeichnung der auftretenden Rauschstrukturen

Im Abschnitt C.I.2 sind das Skalierungsverfahren zur Kennzeichnung des subjektiv erscheinenden Rauschens und die Ergebnisse für die verwendeten Schirm-Film-Kombinationen angegeben. Vergleicht man damit die in C.II.5 angegebenen objektiven Streuungswerte σ , bezogen auf den Abtastbereich von 20μ Ø in der Filmebene, so ergibt sich der in Abb. 57 dargestellte Verlauf: Die Schirm-Film-Kombinationen sind mit der Nummer des Films und dem Schirm-Kennbuchstaben bezeichnet. Das Feld kann in 3 aufsteigende Linien, entsprechend den 3 Schirmen aufgegliedert werden. Die vom Auge signifikant unterschiedlichen Schirmrauschstrukturen werden vom Abtastbereich 20μ Ø nicht erfasst, die Unterschiede liegen in größeren Dimensionen

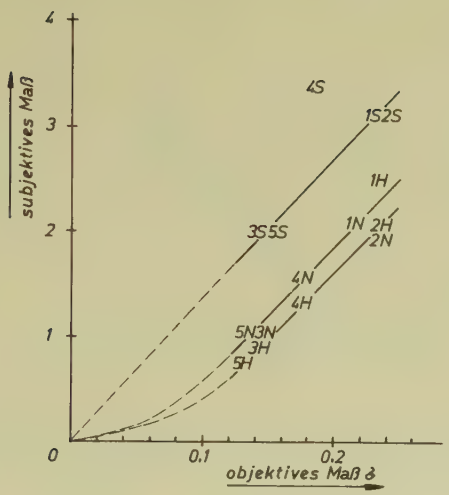


Abb. 57: Vergleich von subjektivem und objektivem Maß der verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen .

("kritischer Bereich") als 20 μ entspr. etwa 5 μ auf der Netzhaut (bei 40 cm Betrachtungsabstand). Das objektive Maß der 3 Schirme H,N,S beim selben subjektiven Maß von 2 verhält sich im Mittel wie etwa 1.0 : 0.9 : 0.6 . Mit zunehmender Abtastfläche müssten sich die δ-Werte bis zum kritischen Bereich im umgekehrten Verhältnis verändern, um wieder eine Übereinstimmung von subjektivem und objektivem Maß zu erreichen. Die aufsteigenden Linien, durch die für jeden Schirm die Werte verschiedener Filme verbunden werden können, zeigen streng monotone Abhängigkeit von subjektivem und objektivem Maß bei konstantem Schirm.

Führt man einen ähnlichen Vergleich zwischen den prozentualen 50%-Erkennbarkeitsschwellen von Landoltringen bei unterlegten Schirm-Film-Rauschstrukturen (D.I.2) und den Kennzahlen des subjektiven Skalierungsverfahrens (C.I.2) durch, so ergibt sich das in Abb. 58 dargestellte Diagramm. Für einen Landoltring mittlerer Größe (Schlitzbreite 1 mm) sind darin die den verschiedenen Schirm-Film-Kombinationen entsprechenden Werte als Abszissen- und Ordinatenwerte aufgetragen.

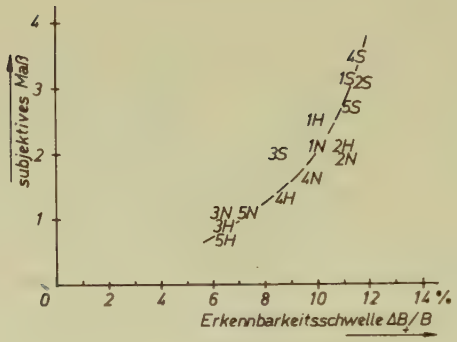


Abb. 58: Vergleich von subjektivem Maß (Skalierung) mit 50%-Erkennbarkeitsschwellen der verschiedenen Schirm-Film-Strukturen, bei einem Landoltring der Schlitzbreite 1(mm) als Testobjekt.

In diesem Diagramm zeigen die zu den verschiedenen Schirmen gehörenden Werte keine signifikante Aufgliederung, sondern können als systematischer Gesamtverlauf angesehen werden. Subjektives Maß der Rauschstruktur und physiologische Schwellenwerte sind eng korreliert: Eine subjektiv als stärker empfundene Rauschstruktur zeigt in diesem Bereich auch eine größere Störsignal-Wirkung bzgl. der Erkennbarkeit von Landoltringen als Testsignalen. Bei größeren Landoltringen (Schlitzbreite 5 mm) ist der Unterschied in den Schwellenwerten i.a. deutlich geringer als der entsprechende Unterschied zweier Strukturen im subjektiv empfundenen Rauschen.

II. Möglichkeiten der Kombination Abtastphotometer-Computer zur Bildanalyse.

Ausgangspunkt ist die Fixierung des Transparenzverlaufs des zweidimensionalen Probenbereichs als Transparenzmatrix. Die lineare Abtastung zur Bestimmung des digitalisierten Transparenzverlaufs leistet das beschriebene Photometer, eine zusätzliche Querverschiebung würde die Matrixabtastung ermöglichen. In praktischen Röntgenbildern, Luftbildern etc. sind Signal- und Rauschstrukturen überlagert, die entsprechenden Datenfolgen werden im Computer gespeichert, daraus Häufigkeitsfunktionen und Summenfunktionen der registrierten Verteilung bestimmt.

II. 1. Signalerkennung bei Gaußschem Rauschen

Viele Rauschstrukturen, die aus einer Reihe statistischer Einzelprozesse resultieren, weisen eine Häufigkeitsfunktion auf, die entsprechend dem zentralen Grenzwertsatz stark an die sogen. Gauß-Verteilung herankommt. Bei einer Gaußfunktion der Streuung σ lässt sich die Summenfunktion der Rauschstruktur, ausgedrückt als Funktion der rel. Transparenz $r = (I - \bar{I}_n)/\sigma$ beschreiben durch

$$SF_n(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{r'} \exp(-r^2/2)\, dr \quad . \tag{82}$$

Unterscheidet sich die Signalstruktur von der mittleren Intensität I_n der Rauschstruktur um die Verschiebung r^*, so ergibt sich für die Summenfunktion der Signalstruktur

$$SF_s(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{r'+r^*} \exp(-r^2/2)\, dr \quad . \tag{83}$$

Betrachtet man den endlichen Abtastbereich F und beträgt der Flächenanteil der Signalstruktur $\Delta F/F$, so folgt als Summenfunktion der Gesamtstruktur

$$SF_{ns}(r') = (1 - \Delta F/F) \cdot SF_n(r') + \Delta F/F \cdot SF_s(r'). \tag{84}$$

Mit Hilfe der Gleichungen (82) und (83) ergibt sich explizit für die Gesamtverteilung

$$SF_{ns}(r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{r'} exp(-r^2/2)dr + \frac{\Delta F}{F\cdot\sqrt{2\pi}}\int_{r'}^{r'+r^*} exp(-r^2/2)dr \qquad (85)$$

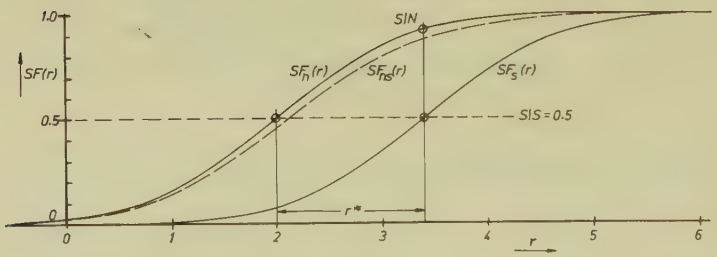


Abb. 59: Gaußverteilungsfunktionen der Rauschstruktur $SF_n(r)$, der Signalstruktur $SF_s(r)$ und der resultierenden Summenfunktion $SF_{ns}(r)$ bei $\Delta F/F=0.1$ bei Teilung der Abszissenachse in σ-Einheiten.

Bei geringen Signalerwartungswerten $\Delta F/F$ wird der Mittelwert $\overline{1}$ dieser Gesamtverteilung nur geringfügig gegenüber $\overline{1}_n$ angehoben. In diesem Fall, in Abb. 59 für $\Delta F/F = 0.1$ dargestellt, weicht auch die Kurve entspr. $SF_{ns}(r)$ im mittleren Bereich nur wenig von der Gaußform ab und ein gegenüber σ etwas geringerer Streuungswert $\tilde{\sigma}$ kann bestimmt werden. Über die Abhängigkeit $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(r^*)$ bei kleinem $\Delta F/F$ als Parameter kann von $\tilde{\sigma}$ auf σ der Rauschverteilung $SF_n(r)$ geschlossen werden. Für $\Delta F/F = 0.1$ sinkt z.B. $\tilde{\sigma}/\sigma$ mit zunehmender Signalgröße r^* assymptotisch auf etwa 90% ab.

Die Funktion $SF_s(r)$ in Abb. 59 gibt die Signalerkennungsrate S|S an, während die Rate der vom System als Signal benannten Rauschstrukturen S|N durch $1 - SF_n(r)$ wiedergegeben wird. In der Praxis ist allerdings nicht S|N direkt interessant, sondern die effektive Falschalarmrate $R_n = 1/(1+\frac{S|S\cdot\Delta F}{S|N\cdot F})$, die den Anteil der vom System resultierenden Falschalarme an der Gesamtan-

zahl der Antworten angibt. In Abb. 60 ist die Abhängigkeit des Gliedes $\frac{S|S}{S|N}$ von der rel. Signalgröße $r^* = \Delta I/(\sigma \cdot \bar{I})$ für Signalerkennungsraten S|S von 50, 90 und 95% als Parameter wiedergegeben. Über die Beziehung $\frac{S|S}{S|N} = (\frac{1}{R_n} - 1)/\frac{\Delta F}{F}$ kann bei vorgegebenem Signalerwartungswert $\Delta F/F$, zugelassener Falschalarmrate R_n und geforderter Signalerkennungsrate S|S aus dieser Abb. 60 die entsprechende Signalgröße $\Delta I = r^* \cdot \sigma \cdot \bar{I}$ bestimmt werden.

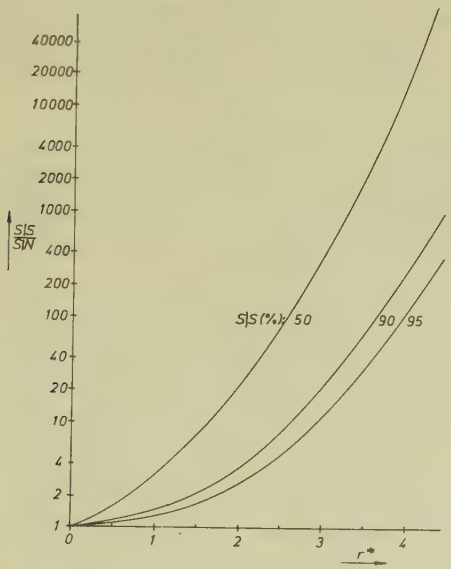


Abb. 60: Theoretischer Zusammenhang bei Gaußschem Rauschen: Signalerkennungsrate S|S / Rate der als Signal bezeichneten Rauschstrukturen S|N als Funktion der rel. Signalgröße r^*, bei S|S als Parameter .

II. 2. Möglichkeiten der Apparatur

Befasst man nun die Anordnung Abtastphotometer-Computer mit der Aufgabe, eine verrauschte photographische Vorlage nach Objektstrukturen abzusuchen, so muß zunächst vorausgesetzt werden, daß der Abtastbereich A_o des Photometers, der Samplingbereich der im Computer gespeicherten Transparenz-

matrix TM_o, deutlich kleiner als die interessierenden Objekte ist. In diesem Fall ist es möglich, durch Integration über einen variierten größeren Abtastbereich A_i, entsprechend einer Integration über Elemente der Matrix TM_o, eine Matrix TM_i zu errechnen, die eine optimale Erkennung eines gesuchten Details bei angepasstem Abtastbereich bietet.

Vermutet man z.B. in der Vorlage Details bestimmter Form aber unterschiedlicher Größe, z.B. Kreisringe, so ist es bei stufenweiser Dehnung des Abtastbereichs A_i möglich, eine für einen Kreisring $K = A_i$ optimale Matrix TM_{io} zu treffen oder mit $K \approx A_i$ und entspr. TM_i wenigstens stark heranzukommen.

Für $TM_i \approx TM_{io}$ und genügend feiner Aufrasterung $A_i \ll A_o$ liefert die Anordnung Abtastphotometer-Computer praktisch die vorstehend, z.B. in Abb. 60 beschriebenen theoretischen Erkennbarkeitsbedingungen.

Angewandt auf die Erkennung von Landoltringen in vorgegebener Matrixanordnung, um einen Vergleich mit den physiologischen Schwellkurven anstellen zu können, kann der Computer in zwei Schritten auf die Suche nach dem Ringschlitz angesetzt werden:

(1) Absuchen der verrauschten Vorlage nach Ringstrukturen und

(2) Absuchen der verrauschten Ringstruktur nach der Lage des Ringschlitzes.

Es stellt sich nun die Frage welche der beiden Stufen die begrenzende ist. Dabei sind bestimmend die beiden Signalerwartungswerte $\Delta F_1/F_1$, $\Delta F_2/F_2$ und die beiden Streuungswerte σ_1 und σ_2. Hierbei gilt für die Ringfläche $\Delta F_1 = F_2$, für den Ringschlitzbereich ΔF_2, während F_1 den Teilbereich der Vorlage angibt, der auf solche Details untersucht wird.

Die Streuungswerte σ verhalten sich bei statistischer Unabhängigkeit der Rauschstruktur für Abtastbereiche F nach σ^2. $F = \text{const.}$, damit gilt in diesem Fall $\sigma_1 = \sqrt{\Delta F_2/F_2} \cdot \sigma_2 \approx 3.5 \cdot \sigma_2$, stets aber $\sigma_1 < \sigma_2$. In der Praxis dürfte F_1 so wählbar sein, daß der Fall $\Delta F_1/F_1 < \Delta F_2/F_2$ durch $\sigma_1 < \sigma_2$ überkompensiert wird und damit Aufgabe (2), das Absuchen der (gefundenen) Ringstruktur nach dem Ringschlitz, die für die Erkennbarkeit begrenzende Stufe ist. Im optimalen Fall der Matrix TM_{io} ist der Abtastbereich A_i gerade gleich dem quadratischen Schlitzbereich, auf diesen Bereich sind auch die im folgenden eingesetzten Streuungswerte σ bezogen.

Der Signalerwartungswert $\Delta F_2/F_2$ beträgt etwa 0.08, die Werte der Schirm-

Film-Rauschstrukturen können über die tabellierten Werte und die Beziehung $\sigma = \sigma(F)$ erhalten werden.

Im folgenden sollen die den Rauschstrukturen Film Nr.3 + Schirm H,N,S für die Signalerkennungsrate S|S = 50% nach obigen Beziehungen errechneten Computer-Erkennbarkeitsfunktionen angegeben und mit den entsprechenden physiologischen Schwellenmessungen verglichen werden. Mit $\Delta F/F = 0{,}08$ und S|S = 50% folgt bei einer zugelassenen Falschalarmrate von 10% (der Systemantworten) eine proz. Signalgröße $\frac{\Delta I}{I} = 100 \cdot r^* \cdot \sigma$ mit $r^* = 2.6$. Die angesetzte Falschalarmrate von 10% der Gesamtaussagen dürfte auch im richtigen Bereich der praktischen Diagnostik liegen.

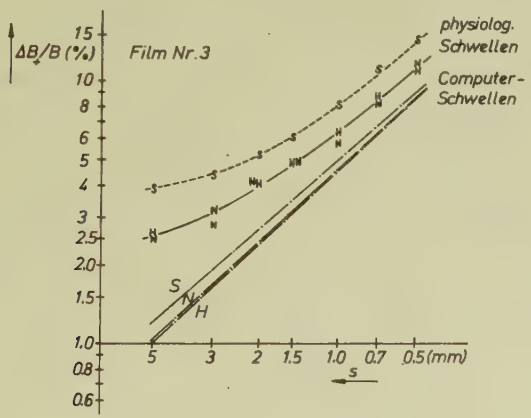


Abb. 61: 50%-Erkennbarkeitsschwellen von Landoltringen mit unterlegten Rauschstrukturen Film Nr.3 + Schirm H,N,S :
(1) physiologische Schwellen, menschlicher Beobachter, 60 asb ,
(2) Abtastphotometer + Computer , bei 10%-iger Falschalarmrate .

II. 3. Vergleich der Computererkennbarkeit mit subjektiven Schwellen

In Abb.61 werden die Schwellen des Systems Abtastphotometer + Computer mit den physiologischen Schwellen verglichen. Den Landoltringen als Signalen sind Rauschstrukturen des Films Nr.3 mit den Schirmen H,N,S unterlegt. Als Streuungswerte werden die mit Computer und beschriebenem Abtastphoto-

meter erhaltenen Werte verwendet. Die in Abb. 61 dargestellte Anordnung wird auch bei den übrigen Rauschstrukturen in analoger Weise erhalten: Das System Computer + Abtastphotometer ist dem menschlichen Beobachter unter den Bedingungen der Tests überlegen, bei kleinen Details etwa um den Faktor 1.5 , bei großen Details etwa um den Faktor 3 . Damit erweist sich das beschriebene System als sehr geeignet für die Auswertung photographischer Vorlagen etc. bei gaußschem Rauschuntergrund.

Nimmt man an, daß bei jedem dargebotenen Landoltring der Beobachter eine Ringstellung angeben muß ("forced choice"), so wäre der Unterschied zwischen menschlichen Beobachter und Computerergebnissen noch größer: Vorausgesetzt sei eine durch diese Methode bedingte Erhöhung der praktischen Erkennungsrate von S|S = 50% um den der Ratewahrscheinlichkeit 1/4 entsprechenden Wert 12.5%, bei einer daraus folgenden Falschalarmrate von 37,5%. Aus einem entsprechenden Diagramm ergibt sich eine prozentuale Signalgröße $\frac{\Delta I}{I} = 100 \cdot r^* \cdot \delta$ mit $r^* = 2.2$. Dadurch sinken die Computerwerte in Abb. 61 um 0.073 log. Einheiten, entsprechend einem resultierenden Faktor von 1.8 gegenüber den Testmessungen bei kleinen und 3.6 bei großen Details.

E. Zusammenfassung

Der subjektiven Kennzeichnung optischer Übertragungssysteme als Erkennbarkeitsschwellen von Testobjekten kann die Systembeschreibung in Form von Punktbildern und Autokorrelationsfunktionen gegenübergestellt werden. Eine praktische Abbildungskette der Röntgendiagnostik bietet durch Austausch von 3 Leuchtschirmen und 5 Filmen die Möglichkeit, die Wirkung der verschiedenen Parameter auf die Detailerkennbarkeit zu untersuchen. Das abzubildende Objekt ist ein Röntgenphantom nach Schober, mit einer den Erfordernissen des Schirmbildsystems angepassten Landoltring-Testplatte. Über gemessene Modulationsübertragungsfunktionen und entsprechende Punktbilder lässt sich die Bildverteilung der Testringe über die Stufen der Übertragungskette verfolgen. Erkennbarkeitstests liefern Schwellenkurven, deren Verlauf für die einzelnen Schirm-Film-Kombinationen als variable Glieder der Kette mit der Abbildung der Landoltringe und Kenngrößen der Rauschstrukturen verglichen werden kann. Neben einer subjektiven Skalierung des Rauschens werden über ein eigens entwickeltes Photometer objektive Rausch-Kenngrößen gewonnen. Das Photometer liefert die automatische Abtastung einer transparenten Vorlage bei Digitalisierung der Intensitätsverteilung und Drift-Nachstellautomatik. In Verbindung mit der Computer-Datenauswertung leistet das Photometer auch eine Bildanalyse. Am Beispiel der Phantomaufnahmen kann eine Überlegenheit dieses Systems in der Detailerkennbarkeit gegenüber dem menschlichen Beobachter nachgewiesen werden.
Die subjektiven Schwellenmessungen zeigen eine erstaunlich geringe Abhängigkeit von der Landoltring-Bildverteilung der verschiedenen Schirme. Der dünnste Schirm mit dem besten Punktbild benötigt bei Testobjekten mittlerer Größe eine höhere Schwelle als die beiden anderen Schirme, erst bei den kleinsten Ringen (Schlitzbreite: 0.5 mm) ist dieser Schirm, der zudem eine höhere Exposition benötigt, den dickeren Schirmen überlegen. Verursacht wird dies durch das Eigenrauschen des relativ dünnen Schirms, wobei die Störstrukturen in der Größenordnung 1 - 2 mm liegen.
Auch die subjektive Bewertung der Rauschstrukturen ist durch ein signifikantes Hervortreten der Aufnahmen mit dem dünnsten Schirm gekennzeichnet.

Das Quantenrauschen kann in diesem Fall als Ursache des verstärkten Gesamtrauschens ausgeschlossen werden.

Für die Praxis kann aufgrund der Schwellenmessungen und der relativen Empfindlichkeitswerte von Filmen und Schirmen die optimale Kombination angegeben werden.

F. Literatur.

Albrecht, C., Oosterkamp, W.J. — The Evaluation of X-Ray Image Forming Systems. Medica mundi, 8, (1960), 106.

Angerstein, W. — Schirmbildphotographie mit der Röntgenkamera 110 aus Jena. Jenaer Rundschau, 14, (1969), 214.

Baudry, Ph. et al. — Recent Contributions to the Study of Photographic Granularity. Journ. Phot. Science, 16, (1968), 132.

de Belder, M., et al. — Image Quality in Photographic Microreproduction. Journ. Phot. Science, 12, (1964), 296.

Berwart, L. — Wiener Spectrum of Experimental Emulsions with Cubic Homogeneous Grains, Comparison of the Spectra with the Wiener Spectra of Commercial Emulsions. Journ. Phot. Science, 17, (1969), 41.

Bierling, L. — Messung der Modulationsübertragungsfunktion von Röntgenschirmbildsystemen. Diplomarbeit, Institut für med. Optik, Universität München, 1965.

Blackwell, H.R. — Contrast Thresholds of the Human Eye. Journ. Opt. Soc. Amer., 36, (1946), 624.

Boseck, S. — Bau und Anwendung eines elektronischen Analogrechners für röntgenphotographische Probleme und Methoden. Diss. Naturwiss. Fak. Universität München, 1967.

Brandt, S. — Statistische Methoden der Datenanalyse. Mannheim, 1968.

Bryngdahl, C. — Erwägungen zur Charakterisierung der Übertragungseigenschaften des phot. und visuellen Systems. Optik, 22, (1965), 196.

Burger, C.C.E. — Phantomversuche mit Röntgenstrahlen. Philips Techn. Rundschau, 11, (1950), 295.

Chantraine, H. Profitlich, P. — Über die Bedeutung von Schärfe und Kontrast für die Mindestdicke von erkennbaren Einzelheiten. Fortschr. Geb. Röntgenstr., 47, (1933), 437.

Carman, B.D., Charman, W.N. — Detection, Recognition and Resolution in Photographic Systems. Journ. Opt. Soc. Amer., 54, (1964), 1121.

Carmichel, G.W. — The Transformation of IR Background Mod. Noise into Equivalent Detector Noise. Infrared Physics, 7, (1967), 11.

Cheng, G.C. et al. — Pattern Recognition with Time Interval Modulation Information Coding. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-6, (1970), 221.

Davies, E.R. — The Efficiency of the Photographic Process. Journ. Phot. Science, 16, (1968), 217.

Falconer, D.G. — Image Enhancement and Film-Grain Noise. Optica Acta, 17, (1970), 693.

Fischer, F.A. — Einführung in die statistische Übertragungstheorie. Mannheim, 1969.

Franke, H., Schuon, H. — Zur optischen und sensitometrischen Gütekennzeichnung von Schirmbildaufnahmen. Fortschr. Geb. Röntgenstr., 90, (1959), 392.

Frieser, H. — Messung des Schwankungsspektrums und der mittleren Schwärzung entwickelter photographischer Aufnahmen. Agfa-Handbuch, Bd. II, (1958), 249.

Frost, D. — Über die Bildunschärfe der Verstärkerfolien und Leuchtschirme. Röntgenblätter, 10, (1957), 191, 234.

Fry, G.A. — Relation of Blur Function to Resolving Power. Journ. Opt. Soc. Amer., 51, (1961), 560.

Fukushima, K. — Visual Feature Extraction by a Multilayered Network of Analog Threshold Elements. IEEE Transactions on System Science and Cybernetics, SSC-5, (1969), 322.

Gajewski, H. — Physikalische und aufnahmetechnische Gesichtspunkte bei Röntgenaufnahmen mit hohen Spannungen. Fortschr. Geb. Röntgenstr., 80, (1954), 643.

Gall, S. — Die Streustrahlenverteilung hinter dem Röntgenphantom und ihr Einfluß auf das Bildrelief. Diplomarbeit, Institut f. med. Optik, Universität München, 1966.

Glocker, R., Macherauch, E. — Röntgen- und Kernphysik für Mediziner und Biophysiker. Stuttgart, 1965.

Göttel, K. — Untersuchung über die Abbildungseigenschaften von Röntgenleuchtschirmen. Diss. Naturwiss.Fak., Universität München 1967.

Greis, U. — Untersuchung der subjektiven Detailerkennbarkeit mit Hilfe der Fouriertransformation und Ortsfrequenzfilterung. Diss.Naturwiss.Fak., Universität München, 1968.

Halmshaw, R. — Photographic Aspects of the Definition Attainable in Radiography. Journ.Phot.Science, 12, (1964), 110.

Hancock, J.C., Wintz, P.A. — Signal Detection Theory. New York, 1966.

Hanke, P. — Der Einfluß der fotographischen Qualität von Luftbildern auf die Präzision des Meßvorganges. Diss., Dresden, 1966.

Haugh, E.F. — A Structural Theory for the Selwyn Granularity Coefficient. Journ.Phot.Science, 11, (1963), 65.

Hendeberg, I.O. — Contrast Transfer Function of the Light Diffusion in Photographic Emulsions. Arkiv för Fysik, 16, (1960), 417.

Hendeberg, L.O. — The Contrast Transfer Function of Periodical Structures in a Phot. Emulsion Developed with Adjacency Effects. Arkiv för Fysik, 16, (1960), 457.

Holm, Th. — Some Aspects of Radiographic Information. Radiology, 83, (1964), 319.

Hondius Boldingh, W. — Grids to Reduce Scattered X-Rays in Medical Radiography. Diss., Techn.Wiss., Eindhoven, 1964.

Hubel, D.H., Wiesel, T.N. — Receptive Fields of Single Neurons in the Cats Striate Cortex. Journ.Physiol., 148, (1959), 574.

Hubel, D.H., Wiesel, T.N. — Receptive Fields, binoculare Interaction and Functional Architecture, in the Cat's Visual Cortex. Journ.Physiol., 1960, (1962), 106.

Jaeger, R.G. — Dosimetrie und Strahlenschutz. Stuttgart, 1959.

Jamieson, J.A. — Inference of Two-Dimensional Wiener Spectra from One-Dimensional Measurements. Infrared Physics, 1, (1961), 133.

Jennison, R.C. — Fourier Transforms and Convolutions for the Experimentalist. Oxford, 1961.

Jones, L.A., Higgins, G.C., Stulte, K.F. — Photographic Graininess and Granularity.
Journ.Opt.Soc.Amer., 35, (1945), 435.
" " " " 36, (1946), 203.
" " " " 38, (1948), 398.
" " " " 45, (1955), 107.

Jones, R.C. — New Method for Describing and Measuring the Granularity of Photographic Materials. Journ.Opt.Soc.Amer., 45, (1955), 799.

Kelton, G. et al. — Infrared Target and Background Radiometric Measurements - Concepts, Units and Techniques. Infrared Physics, 3, (1963), 139.

Klein, E., Langer, G. — Relation between Granularity, Graininess and the Wiener-Spectrum of the Density Deviation. Journ.Phot.Science, 11, (1963), 177.

Koch, T. — Über die Möglichkeiten der Herabsetzung der Strahlendosis bei Schirmbildaufnahmen durch aktivierte Filmentwicklung. Fortschr.Geb.Röntgenstr., 90, (1959), 738.

Korthals Altes, J. — Logische Schaltungen mit Transistoren. Eindhoven, 1966.

Kritikos, G. — Untersuchungen zur subjektiven Erkennbarkeit von Signalen im zeitlich und örtlich veränderten Rauschen. Diss., Naturwiss.Fak., Universität München, 1968.

Kroebel, W. — Ein Testbild zur Gütebeurteilung von Fernsehbildern und Projektionsoptiken. Naturwissenschaften, 45, (1958), 205.

Landgraf, Ch. — Über verallgemeinerte Korrelations-und Optimalfilter-Empfänger für den Empfang statistischer oder statistisch gestörter Signale in zusätzlichem aktiven Rauschen. Dt. Versuchsanstalt für Luft-u.Raumfahrt, Forschungsbericht 65-28.

Langer, G. — Zur Berechnung der Körnigkeit und der Kontrastschwelle photographischer Schichten. Phot. Korrespondenz, 99, (1963), 177.

La Torre, V.R. — Signal-To-Noise Enhancement. Instruments and Control Systems, 42, (1969), 129.

Lendaris, G.G. Stanley, G.L. — Diffraction-Pattern Sampling for the Automatic Pattern Recognition. Proceedings of the IEEE, 58, (1970), 198.

Levi, L. — On Combined Spatial and Temporal Characteristics of Optical Systems. Optica Acta, 17, (1970), 869.

Linfoot, E.H. — Qualitätsbewertung optischer Bilder. Braunschweig, 1960.

Lissner, J. — Der Wert der Modulationsübertragungsfunktion für die Beurteilung der Fernsehbildqualität. Fortschr. Geb. Röntgenstr., 110, (1969), 87.

Lossen, H., Ehrenstein, W. — Das Röntgenbild als Wahrnehmungsgegenstand. Röntgenblätter, 5, (1952) 21, 62.

Morgan, R.H. — An Analysis of the Physical Factors Controlling the Diagnostic Quality of Roentgen Images.
Part 1: Introd., Amer. Journ. Roentgenol., 54, (1945), 128.
2: Max. Resolv. Power, " , 54, (1945), 395.
3: Contr. Intens. Distr. Funct." , 55, (1946), 67.
4: Contr. Film Contrast Fact." , 55, (1946), 627.

Mees, C.E.K. — The Theory of The Photographic Process. New York 1959.

Meienburg, P. — Die Landnutzungskartierung nach Pan-, Infrarot- und Farbluftbildern. Diss. TH München, 1966.

Nawijn, A. — Kontrastübertragung und die Qualität der Spiegel-Kamera für Röntgenschirmbildphotographie. Röntgenblätter, 16, (1963), 227.

Nelson, A. — Determination of Physical Factors Influencing the Quality of the Radiographic Image. Acta Radiol. Suppl. LXXVI, Stockholm 1949.

Ogle, K.N. — Blurring of the Retinal Image and Contrast Threshold in the Fovea. Journ. Opt. Soc. Amer., 50, (1960), 307.

O'Neill, E.L. — Introduction to Statistical Optics. Reading, Mass. 1963.

Ooue, S. — The Photographic Image. in: Progress in Optics, Vol. VII, Edit.: E. Wolf Amsterdam 1969.

Pfahnl, A. — Über Röntgenleuchtschirme und Röntgenverstärkerfolien. Röntgenblätter, 10, (1957), 7 u. folg.

Pfeiler, M., Reiss, K.H. Schott, O. — Die Intensitätsverteilung im Strahlenrelief als Eingangsgröße beim Röntgenfernsehen. Elektromedizin, 11, (1966), 17.

Reuther, R. Rudolph, J. — Über die Kennzeichnung der Bildschärfe photographische Aufnahmen. Zeitschr. f. wiss. Phot., 61, (1967), 125.

Riva, Ch. — Vergleich zwischen verschiedenen Methoden zur Messung der Körnigkeit photographischer Schichten. Photogr. Korrespondenz, 105, (1969), 111.

Röhler, R. — Über den Einfluß von Randschärfe und Kontrast auf die Detailerkennbarkeit bei phot. Aufnahmen mit besonderer Berücksichtigung der Röntgendiagnostik. Zeitschr. f. angew. Physik, 8, (1956), 577.

Röhler, R. — Untersuchungen zur Detailerkennbarkeit im Röntgenbild. Fortschr. Geb. Röntgenstr., 86, (1957), 376.

Röhler, R. — Zur Definition und Messung der Unschärfe im Röntgenbild. Zeitschr. f. angew. Physik, 10, (1958), 43.

Röhler, R. — Die Informationsübertragung durch den Gesichtssinn bei einfachen Testaufgaben. Optik, 15, (1958), 604.

Rosenbruch, K.J. — Die Kontrastempfindlichkeit des Auges als Beitrag zur Gütebeurteilung optischer Bilder. Optik, 16, (1959), 135.

Rossmann, K. — Spatial Fluctuation of X-Ray Quanta and the Recording of Radiographic Mottle. Amer. Journ. Roentgenology, 90, (1963), 863.

Rossmann, K. — The Spatial Frequency Spectrum: A Means for Studying the Quality of Radiographic Imaging Systems. Radiology, 90, (1968), 1.

Sappl, E. — Optimierung linearer Systeme für statistische Signale. Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt. Forsch.-Bericht 64-24. (1964)

Schade, O.H. — An Evaluation of Photographic Image Quality and Resolving Power. Journ.Soc.Mot.Pict.& Tel.Eng., 73, (1964), 81.

Schober, H. — Untersuchungen über Verwendbarkeit des Landoltschen Ringes als Normzeichen bei der Sehschärfenbestimmung. Optik, 9, (1952), 225.

Schober, H., Klett, C. — Phantomuntersuchungen über den Einfluß der Betrachtungsmethodik auf die Erkennbarkeit von Details in der Röntgenaufnahme. Röntgenblätter, 5, (1952), 51.

Schober, H., Roggenhausen, M. — Phantomuntersuchungen über den Einfluß der Dunkelkammertechnik auf die Darstellbarkeit von Details in der Röntgenaufnahme. Röntgenblätter, 5, (1952), 128.

Schober, H. — Die klinische Bedeutung der Feinfokusröhre. Röntgenblätter, 6, (1953), 101.

Schober, H. — Die Abhängigkeit des Schwärzungskontrastes einer Röntgenaufnahme von Röhrenspannung und mAsec-Produkt. Fortschr.Geb.Röntgenstr., 78, (1953), 471.

Schober, H. — Die Detailerkennbarkeit bei der Schirmbildaufnahme im Vergleich zur Großaufnahme und Durchleuchtung. Röntgenblätter, 7, (1954), 368.

Schober, H., Evers, E. — Über den Einfluß der Fokusgröße auf die Detailerkennbarkeit kleinster Objekte. Röntgenblätter, 8, (1955), 67 & 9, (1956), 313.

Schober, H. — Informationstheorie in Optik und Fernsehen. Optik, 13, (1956), 350.

Schober, H. — Weitere Untersuchungen zur Detailerkennbarkeit bei Schirmbildaufnahmen. Röntgenblätter, 9, (1956), 53.

Schober, H. — Die Abhängigkeit des Bildeindrucks von der Struktur des Netzhautbildes. Kinotechnik, 18, (1964), 113.

Schott,O. — Die Zahl der Quanten in der diagnostischen Röntgenstr. Röntgenblätter,10,(1957),257.

Schroeck-Vietor,W. — Zur Erfassung der technischen Qualität und des Informationsgehaltes von Röntgenbildern durch die Untersuchung ihres Autokorrelogramms. Naturwissenschaften,45,(1958),155.

Schwegler,F. — Untersuchungen zum Einfluß des optischen Rauschens auf die Unterschiedsempfindlichkeit. Diss.Naturwiss.Fak., Universität München, 1969.

v.Seelen,W. — Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere I. Kybernetik,7,(1970),43.

Shaw,R. — Photon Fluctuations,Equivalent Quantum Efficiency and Information Capacity of Photographic Images. Journ.Phot.Science,11,(1963),313.

Shaw,R., — Practical Factors Influencing the Signal-To-Noise Ratio of Photographic Images. Journ.Phot.Science,17,(1969),205.

Spiegler,G. — Schärfe und Auflösungsvermögen im Röntgenbild, alte Auffassungen neu betrachtet. Röntgenblätter,7,(1954),386.

Spiegler,G. — Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik. Stuttgart, 1957.

Stieve,F.E. Widenmann,L. — Die Beurteilung der Güte eines Röntgenbildes. Röntgenblätter,20,(1967),109.

Stürmer,W. — Moderne Röntgenleuchtschirme und Folien. Der Radiologe,2,(1962),425.

Stultz,K.F., Zweig,H.J. — Roles of Sharpness and Graininess in Photographic Quality and Definition. Journ.Opt.Soc.Amer.,52,(1962),45.

Swets,A. — Signal Detection and Recognition by Human Observers. New York, 1964.

Teves,M.C., Tol,T. — Elektronische Verstärkung von Röntgenbildern. Philips Techn.Rundschau,14,(1952/53),37.

Wagenaar, W.A., Van Meeteren, A. — Noisy Line-Scan Pictures. Photogrammetric Engineering, 35, (1969), 1127.

Wirth, W.-D. — Die Unterdrückung von Störsignalen bei Kenntnis ihrer Korrelationsfunktion. Nachrichtentechn. Zeitschr., 23, (1970), 64.

Zeitler, E. — Die Übertragungstheorie in der Photographie Agfa-Handbuch Bd. II, (1968), 217.

G. Anhang: Algol-Programme

```
'BEGIN'
'COMMENT' PUNKTBILD BZW. SPALTBILD DES ROEHRENFOKUS
          FUER AUSGEDEHNTE OBJEKTE AUSSERHALB  UND AUF DER ACHSE
          UND DIE ENTSPRECHENDEN MODULATIONSUEBERTRAGUNGSFUNKTIONEN.;
'INTEGER' I,XB,K,M,SE,ME,KE,TEST.;
'REAL' FGR,FAK,FSA,DEL,DI,A,DX,DX2,C1,C2,C3,C4,C41,C5,C6,
       D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8,D9,D10,D101,D11,D12,D13,D14,D15,
       E1,E2,E3,Y,DV,G0,G1,G2,G3,G4,G5,G6,H1,H2.;
'REAL' 'PROCEDURE' JNULL.; 'CODE';
READ(FGR,FAK,FSA,DEL,A,DI,KE,DX,SF,DV,ME,TEST).;
DX2.= DX * DX .;

'BEGIN' 'ARRAY' S(/0..SE/),MTF,MTFS(/0..ME/) .;
'IF' FAK 'GREATER' 0 'THEN'
'GO TO' SPR1.;
C5.= 0 .;
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' 150 'DO'
'BEGIN'
C1.= 0.01 * I .;
C2.= C1*C1*C1 .;
C3.= -C2*C2*C2*C2 .;
C4.= EXP(C3) .;
C41.= I * C4 .;
C5.= C5 + C41 .;
'END'.;
'IF' FGR 'GREATER' 0 'THEN'
C6.= 0.0008 / (FGR*FGR)
'ELSE'
'GO TO' STOP .;
FAK.= C5 * C6 .;
'IF' FAK 'GREATER' 0 'THEN'
FAK.= SQRT(FAK)
'ELSE'
'GO TO' STOP .;
SPR1..
PAGE.;
WRITE('('
FOKUSGROESSE (MM) .. ')').;
PRINT(FGR) .;
WRITE('('

NORMIERUNGSFAKTOR FAK.. ')').;
PRINT(FAK).;
WRITE('('

FOKUS-SCHIRM        OBJEKT-SCHIRM        ACHSEN-
ABSTAND..           ABSTAND..            ABSTAND..
                                                  ')').;
PRINT(FSA,DEL,A).;
WRITE('('
MM .

OBJEKT-             ANZAHL DER           SCHRITT-
DICKE..             ABTASTPUNKTE..       WEITE..
                                                ')').;
'IF' KE 'GREATER' 0 'THEN'
H1.= 0.5 * DI / KE
```

```
'ELSE'
H1.= DI.'
PRINT(DI'2*KE+1'H1).'
WRITE('('
MM.                                          MM.


ABSCHAETZUNG DER MINIMALSCHRITTWEITE DELTA D
MIT DER FORMEL   DELTA D = (FGR/2)*DEL/A  '

DELTA D ..
                                    ')').'
'IF' A 'GREATER' 0 'THEN'
'BEGIN'
H2.= 0.5 * FGR * DEL / A .'
PRINT(H2) .'
WRITE('('
MM.      ')').'
'END'
'ELSE'
WRITE('('
UNBESCHRAENKT.     ')').'
PAGE.'
WRITE('('
PUNKTBILDVERTEILUNG' NORMIERT'
INTERVALLAENGE.. ')').'
PRINT(DX).'
WRITE('('  MM.

            XB..            S(/XB/)..
                                                ')').'
'IF' FSA 'GREATER' DEL 'THEN'
D1.= FSA/(FSA-DEL)
'ELSE'
'GO TO' STOP.'
D2.=  DI/(2*KE) .'
D3.= D1*A*D2 .'
'FOR' XB.=0 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
'BEGIN'
D15.= 0 .'
D4.= DX*XB .'
'FOR' K.=-KE 'STEP' 1 'UNTIL' KE 'DO'
'BEGIN'
D5.= K*D2 .'
D6.= DEL-D5 .'
'IF' D6 'NOT GREATER' 0 'THEN'
'GO TO' STOP .'
D7.= FSA/D6 - 1 .'
D8.= D4*D7 .'
D9.= D3*K/D6 .'
D10.= D8 + D9 .'
D101.= FAK * D10 .'
D11.= ABS(D101) .'
D12.= D11*D11*D11 .'
D13.= -D12*D12*D12*D12 .'
D14.= EXP(D13) .'
D15.= D15 + D14 .'
'END'.'
S(/XB/).= D15 .'
```

```
'END'.'
E1.= S(/0/) .'
'IF' E1 'NOT GREATER' 0 'THEN'
'GO TO' STOP .'
'FOR' XB.=0 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
'BEGIN'
E2.= S(/XB/) .'
E3.= E2 / E1 .'
S(/XB/).= E3 .'
PRINT(XB,E3).'
'END'.'
G1.= 0 .'
Y.= 0 .'
'FOR' XB.=1 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
G1.= S(/XB/)*JNULL(Y)*XB*DX2 + G1 .'
'IF' G1 'NOT GREATER' 0 'THEN'
'GO TO' STOP .'
G0.= 6.28318**DX*DV .'
'FOR' M.=1 'STEP' 1 'UNTIL' ME 'DO'
'BEGIN'
G2.= 0 .'
G5.= G0 * M .'
'FOR' XB.=1 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
'BEGIN'
Y.= G5 * (XB-0.5) .'
G2.=  S(/XB/)*JNULL(Y)*XB*DX2 + G2 .'
'END'.'
MTF(/M/).= G2 .'
'END'.'
'FOR' M.=1 'STEP' 1 'UNTIL' ME 'DO'
'BEGIN'
G3.= MTF(/M/) .'
G4.= G3 / G1 .'
MTF(/M/).= G4 .'
'END'.'
'IF' TEST 'EQUAL' 1 'THEN'
'BEGIN'
PAGE.'
WRITE('('
MODULATIONSUEBERTRAGUNGSFUNKTION  BZGL. PUNKTBILD
SCHRITTWEITE DV (1/MM) ..     ')').'
PRINT(DV).'
WRITE('('

          M..            MTF(/M/)..
                                                ')').'
'FOR' M.=1 'STEP' 1 'UNTIL' ME 'DO'
PRINT(M,MTF(/M/)).'
'GO TO' STOP .'
'END'.'
PAGE.'
WRITE('('
MODULATIONSUEBERTRAGUNGSFUNKTION BZGL. PUNKTBILD UND SPALTBILD
SCHRITTWEITE  DV(1/MM)..            ')').'
PRINT(DV).'
WRITE('('

          M..           MTF(/M/)..          MTFS(/M/)..
                                                ')').'
```

```
G1.= 0 .'
Y.= 0 .'
'FOR' XB.=1 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
G1.= S(/XB/) * COS(Y) * DX + G1 .'
'IF' G1 'NOT GREATER' 0 'THEN'
'GO TO' STOP .'
G0.= 6.283185 * DV * DX .'
'FOR' M.=1 'STEP' 1 'UNTIL' ME 'DO'
'BEGIN'
G2.= 0 .'
G5.= G0 * M .'
'FOR' XB.=1 'STEP' 1 'UNTIL' SE 'DO'
'BEGIN'
Y.= G5 * (XB-0.5) .'
G2.= S(/XB/) * COS(Y) * DX + G2 .'
'END'.'
MTFS(/M/).= G2 .'
'END'.'
'FOR' M.=1 'STEP' 1 'UNTIL' ME 'DO'
'BEGIN'
G3.= MTFS(/M/) .'
G4.= G3 / G1 .'
G6.= MTF(/M/) .'
PRINT(M,G6,G4) .'
'END'.'
'END'.'
STOP..
'END'.'
```

```
'BEGIN'
'COMMENT' BERECHNUNG DER INTENSITAETSVERTEILUNG EINES LANDOLTRING-
          BILDES FUER VERSCHIEDENE DURCH DAS JEWEILIGE PUNKTBILD
          GEKENNZEICHNETE ABBILDUNGSSYSTEME --- IM SPALTBEREICH
          UND AUF DEM MITTENKREIS EINES LANDOLTRINGES VOM DURCH-
          MESSER -- 250 EINHEITEN --  .;

'INTEGER' P,H,L,EF1,ERS,V,U2,M1,M2,I,O,BESPEICH,SPEICH,TEST,J,BOG,OA,K,
          SWF,DM,SP,TRANS.;

'REAL' LIMIT,EF2,EF3,EF4,KONST,EF5,EF6,EG1,EG2,R2,FL,ARG,E,EK1,EK2,
       EK3,EK4,EK5,EK6,EK7,EK8,EK9,EK10,F1,EK11,EK12,EK13,EK14,F2,
       EL1,C,EL2,GAMMA,GA,DGA,GAM,KONTR,EL3,EL4,EL5,EL6.;

READ(P,V,M1,M2,O,SPEICH,LIMIT,TEST,TRANS,GA,DGA,GAM,KONTR).;

WRITE('('

BENOETIGTE SPEICHERPLAETZE ..  ')').;
BESPEICH.= P*(2*V+M2+3) + 241*M2 + M1*(O+1) + O .;
TYPE(BESPEICH) .;
WRITE('('

VERFUEGBARE SPEICHERPLAETZE ..  ')').;
TYPE(SPEICH) .;
'IF' BESPEICH 'GREATER' SPEICH 'THEN' 'GO TO' STOP .;
PAGE.;

'BEGIN' 'INTEGER' 'ARRAY' SW,U1(/1..P/).;
        'ARRAY' S,SL(/1..P,1..V/),Z(/1..M2/),G2(/1..M2,1..240/),
                OB(/1..M1/),F(/1..O/),G1(/1..M1,1..O/),B(/1..P/),
                D(/1..P,1..M2/).;

'COMMENT' EXTRAPOLATION DER PUNKTBILDVERTEILUNGEN BIS ZU EINEM
          BESTIMMTEN LIMIT BZW. BIS AN DIE INTEGRATIONSGRENZE V  .;

'FOR' H.=1 'STEP' 1 'UNTIL' P 'DO'
'BEGIN' WRITE('('

        VORGEGEBENE PUNKTBILDVERTEILUNG NR ..  ')').;
        TYPE(H).;
        WRITE('('

        SCHRITTWEITE ..  ')').;
        READ(SW(/H/)).;
        TYPE(SW(/H/)).;
        WRITE('('  MUE .

        ANZAHL DER EINGABEWERTE ..  ')').;
        READ(U1(/H/)).;
        TYPE(U1(/H/)).;
        'FOR' L.=1 'STEP' 1 'UNTIL' U1(/H/) 'DO'
        READ(S(/H,L/)).;
        WRITE('('

        LIMIT DER EXTRAPOL.WERTE ..  ')').;
        PRINT(LIMIT).;
```

```
        WRITE('('
        ERREICHT BEI U2 ..  ')').'
        EF1.= U1(/H/).'
        'FOR' L.=1 'STEP' 1 'UNTIL' EF1 'DO'
        SL(/H,L/).= S(/H,L/) * (L-0.5).'
        ERS.= EF1 + 1 .'
        EF2.= SL(/H,EF1/).'
        EF3.= SL(/H,EF1-2/).'
        EF4.= LN(EF3/EF2).'
        KONST.= EF4/2 .'
START.. EF5.= -KONST*(ERS-EF1).'
        EF6.= EXP(EF5).'
        SL(/H,ERS/).= EF2*EF6 .'
        S(/H,ERS/).= SL(/H,ERS/) / (ERS-0.5) .'
        'IF' S(/H,ERS/) 'LESS' LIMIT 'THEN'  'GO TO' ZIEL2 .'
        ERS.= ERS + 1 .'
        'IF' ERS 'GREATER' V 'THEN'  'GO TO' ZIEL1 .'
        'GO TO' START .'
ZIEL1.. TYPE(V).'
        WRITE('('  EINHEITEN .
        BERECHNUNG DER NAEHERUNGSFUNKTION ABGEBROCHEN .
                                                              ')').'
        'GO TO' ZIEL3 .'
ZIEL2.. U2.= ERS .'
        TYPE(U2).'
        WRITE('('  EINHEITEN .
                                ')').'
        'IF' U2 'EQUAL' V 'THEN' 'GO TO' ZIEL3 .'
        'FOR' L.=U2+1 'STEP' 1 'UNTIL' V 'DO'
        'BEGIN' S(/H,L/).= 0 .'
                SL(/H,L/).= 0 .'
        'END'.'
ZIEL3.. WRITE('('

            L..          S(/H,L/)..          SL(/H,L/)..
                                                          ')').'
        'FOR' L.=1 'STEP' 1 'UNTIL' V 'DO'
        PRINT(L,S(/H,L/),SL(/H,L/)).'
        PAGE.'
'END'.'
'IF' TEST  'EQUAL' 7 'THEN'  'GO TO' STOP .'

'COMMENT' BERECHNUNG DER GEWICHTSFUNKTIONEN FUER EINEN LANDOLTRING
          VOM DURCHMESSER  -- 250 EINHEITEN --  UND VERSCHIEDENE
          AUFPUNKTE, GEKENNZEICHNET DURCH DEN BOGENABSTAND Z(/I/)
          VON DER BEZUGSKANTE  .'

WRITE('('

AUFPUNKTE ..

ANZAHL ..
            M1..                M2..                    ')').'
PRINT(M1,M2).'
'IF' M1 'GREATER' M2 'THEN' 'GO TO' STOP .'
WRITE('('

            I..           Z(/I/)..
                         ')').'
```

```
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M1 'DO'
'BEGIN' READ(Z(/I/)).'
        PRINT(I,Z(/I/)).'
        'IF' Z(/I/) 'NOT GREATER' 0,0001 'THEN' 'GO TO' STOP .'
        WRITE('('      G1  UND  G2      . ')').'
'END'.'
'IF' M2 'EQUAL' M1 'THEN' 'GO TO' SPR1 .'
'FOR' I.= M1+1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
'BEGIN' READ(Z(/I/)).'
        PRINT(I,Z(/I/)).'
        WRITE('('           G2          . ')').'
'END'.'
SPR1.'
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
'BEGIN' 'IF' Z(/I/) 'GREATER' 26 'THEN' 'GO TO' STOP .'
        'IF' Z(/I/) 'LESS' -300 'THEN' 'GO TO' STOP .'
'END'.'
PAGE.'
WRITE('('

                    GEWICHTSFUNKTION  G2  ..
                                                              ')').'

'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
'BEGIN' EG1.= 0,01 * Z(/I/) .'
        'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' 240 'DO'  G2(/I,J/).= 0 .'
        'FOR' BOG.=0 'STEP' 1 'UNTIL' 1158 'DO'
        'BEGIN' EG2.= 0,005 * BOG + EG1 .'
                'FOR' R2.= 75,25 'STEP' 0,5 'UNTIL' 125 'DO'
                'BEGIN' FL.= 0,0025 * R2 .'
                        ARG.= 10000 + R2*R2 - 200*R2*COS(EG2) .'
                        ARG.= ABS(ARG) .'
                        E.= SQRT(ARG) .'
                        J.= ENTIER(E) + 1 .'
                        G2(/I,J/).= FL + G2(/I,J/) .'
                'END'.'
        'END'.'
        'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' 240 'DO'
        G2(/I,J/).= G2(/I,J/) / ((J-0,5)*6,2831853) .'
'END'.'
'IF' TEST  'EQUAL' 1 'THEN'
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
'BEGIN' WRITE('('

        BOGENABSTAND ..  ')').'
        PRINT(Z(/I/)).'
        WRITE('('
        EINHEITEN .

            J..         G2(/I,J/)..
                                                    ')').'
        'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' 240 'DO'
        PRINT(J,G2(/I,J/)).'
        PAGE.'
'END'
'ELSE'
WRITE('('

GEWICHTSFUNKTION G2 NICHT AUSGEDRUCKT .
                                                  ')').'
```

```
WRITE('('

                    GEWICHTSFUNKTION  G1 ..
                                                                    ')').'
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M1 'DO'
'BEGIN' EK1.= Z(/I/) .'
        EK2.= EK1*EK1 .'
        EK3.= 50 - EK1 .'
        EK4.= EK3*EK3 .'
        EK5.= SQRT(625 + EK2) .'
        OA.= ENTIER(EK5) .'
        'IF' OA 'NOT GREATER' 0 'THEN'
        OB(/1/).= OA
        'ELSE'
        OB(/1/).= 0 .'
        'FOR' K.=1 'STEP' 1 'UNTIL' OB(/I/) 'DO'
        'BEGIN' EK6.= K*K .'
                EK7.= EK6 - EK2 .'
                'IF' K 'NOT GREATER' EK1 'THEN'
                F1.= 0
                'ELSE'
                'BEGIN'
                EK8.= SQRT(EK7) .'
                EK9.= EK8/EK1 .'
                EK10.= ARCTAN(EK9) .'
                F1.= EK6*EK10 - EK1*EK8 .'
                'END'.'
                'IF' K 'NOT GREATER' EK3 'THEN'
                F2.= 0
                'ELSE'
                'BEGIN'
                EK11.= EK6 - EK4 .'
                EK12.= SQRT(EK11) .'
                EK13.= EK12/EK3 .'
                EK14.= ARCTAN(EK13) .'
                F2.= EK6*EK14 - EK3*EK12 .'
                'END'.'
                F(/K/).= F1 + F2 .'
        'END' .'
        G1(/1,1/).= F(/1/) .'
        'FOR' K.=2 'STEP' 1 'UNTIL' OB(/I/) 'DO'
        G1(/1,K/).= F(/K/) - F(/K-1/) .'
        'FOR' K.=1 'STEP' 1 'UNTIL' OB(/I/) 'DO'
        G1(/1,K/).= G1(/I,K/) / ((K-0.5)*6.2831853) .'
'END'.'
'IF' TEST  'EQUAL' 1 'THEN'
'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M1 'DO'
'BEGIN' WRITE('('

        ABSTAND ZUR BEZUGSKANTE ..  ')').'
        PRINT(Z(/I/)).'
        WRITE('('
        EINHEITEN .

            K..         G1(/I,K/)..
                                                    ')').'
        'FOR' K.=1 'STEP' 1 'UNTIL' OB(/I/) 'DO'
        PRINT(K,G1(/I,K/)).'
        PAGE.'
```

```
'END'
'ELSE'
WRITE('('

GEWICHTSFUNKTION G1 NICHT AUSGEDRUCKT .
                                                    ')').'

'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M1 'DO'
'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' OB(/I/) 'DO'
G2(/I,J/).= G1(/I,J/) .'
WRITE('('

RESULTIERENDE GEWICHTSFUNKTION AUS G1 UND G2 GEBILDET .
                                                              ')').'

'COMMENT' BERECHNUNG DER INTENSITAETSVERTEILUNG D(/Z/) FUER PUNKTE
          AUF DEM MITTENKREIS DES LANDOLTRINGES -- DURCHMESSER 250
          EINHEITEN -- IM BOGENABSTAND Z(/I/) VON DER BEZUGSKANTE  .'

WRITE('('
BEZUGSINTEGRAL B(/H/) UEBER INTEGR.BEREICH' ERRECHNET AUS DER
PUNKTBILDVERTEILUNG ..

H..                B(/H/)..
                                ')').'
'FOR' H.=1 'STEP' 1 'UNTIL' P 'DO'
'BEGIN' EL1.= 0 .'
        'FOR' L.=1 'STEP' 1 'UNTIL' V 'DO'
        EL1.= SL(/H,L/) + EL1 .'
        B(/H/).= EL1 .'
        PRINT(H,EL1).'
'END'.'
PAGE.'

WRITE('('

                    INTENSITAETSVERTEILUNG  D(/Z/) ..
                                                          ')').'
'FOR' H.=1 'STEP' 1 'UNTIL' P 'DO'
'BEGIN' WRITE('('

        FUER PUNKTBILDVERTEILUNG NR ..  ')').'
        TYPE(H) .'
        WRITE('('

        SCHRITTWEITE ..  ')').'
        SWE.= SW(/H/) .'
        TYPE(SWE).'
        WRITE('('  MUE .

        DURCHMESSER DES LANDOLTRINGES ..  ')').'
        DM.= 250 * SWE.'
        TYPE(DM) .'
        WRITE('('  MUE .
        SPALTBREITE DES LANDOLTRINGES ..  ')').'
        SP.= 50 * SWE.'
        TYPE(SP) .'
        WRITE('('  MUE .

        Z(/I/)..          C..              D(/H,I/)..
```

```
                                                                    ')').'
        'IF' V 'NOT GREATER' 240 'THEN'
        'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
        'BEGIN' EL2.= 0 .'
                'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' V 'DO'
                EL2.= (1-G2(/I,J/))*SL(/H,J/) + EL2 .'
                D(/H,I/).= EL2 / B(/H/) .'
                PRINT(Z(/I/),EL2,D(/H,I/)).'
        'END'
        'ELSE'
        'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
        'BEGIN' EL2.= 0 .'
                'FOR' J.=1 'STEP' 1 'UNTIL' 240 'DO'
                EL2.= (1-G2(/I,J/))*SL(/H,J/) + EL2 .'
                'FOR' J.=241 'STEP' 1 'UNTIL' V 'DO'
                EL2.= SL(/H,J/) + EL2 .'
                D(/H,I/).= EL2 / B(/H/) .'
                PRINT(Z(/I/),EL2,D(/H,I/)).'
        'END'.'
        PAGE.'
'END'.'
'IF' TRANS 'NOT EQUAL' 1 'THEN'  'GO TO' STOP .'

'COMMENT' BERECHNUNG DER REL. DURCHLAESSIGKEITEN T(H,I) FUER DEN DURCH
          GAMMA BESTIMMTEN LINEAREN TEIL DER SCHWAERZUNGSKURVE AUS
          D(H,I) .'

'FOR' H.=1 'STEP' 1 'UNTIL' P 'DO'
'FOR' GAMMA.=GA 'STEP' DGA 'UNTIL' GAM 'DO'
'BEGIN' WRITE('('

        REL.DURCHLAESSIGKEITEN T(H,I) FUER PUNKTBILDVERTEILUNG NR.
                                                                    ')').'
        TYPE(H) .'
        WRITE('('
        KONTR ..        ')').'
        PRINT(KONTR).'
        WRITE('('

        GAMMA..             Z(/I/)..            T(/H,I/)..
                                                        ')').'
        'FOR' I.=1 'STEP' 1 'UNTIL' M2 'DO'
        'BEGIN' EL3.= (1+D(/H,I/)*KONTR)/(1+KONTR).'
                EL4.= LN(EL3).'
                EL5.= GAMMA*EL4 .'
                EL6.= EXP(EL5) .'
                PRINT(GAMMA,Z(/I/),EL6) .'
        'END'.'
        PAGE.'
'END'.'
'END'.'
STOP..
'END'.'
```

```
'BEGIN'
'COMMENT' AKF-NEU;
'INTEGER' I,H,P,N,M,C10,H10,A,D,W;
'REAL' C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C11,C12,C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19,
       C21,C22,C23,D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,S,T;
'INTEGER' 'PROCEDURE' TIME; 'CODE';
'ARRAY' X[1:2000],Y[1:20,0:10],Z,MW[0:10];
W:= 0 ;
HI:
H:= H + 1 ;
T:= TIME ;
'IF' T 'GREATER' 1100 'THEN' 'GO TO' STOP ;
READ(A,N,D);
'IF' N 'GREATER' 2000 'THEN' 'GO TO' STOP ;
C1:= 0,01 * N + 0,0001 ;
C10:= ENTIER(C1) ;
'IF' C10 'GREATER' 20 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'IF' C10 'LESS' 1 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO'
READ(X[I]);
H:= 0 ;
SPR1: H:= H + 1 ;
H10:= 100 * H ;
C3:= 0 ;
'FOR' I:=H10-99 'STEP' 1 'UNTIL' H10 'DO'
'BEGIN'
C2:= X[I] ;
C3:= C2 + C3 ;
'END';
C4:= 0,01 * C3 ;
C5:= C4 + D ;
MW[H]:= C5 ;
C7:= C5*C5*90 ;
'IF' C7 'GREATER' 0 'THEN'
C8:= 1  /C7
'ELSE'
'GO TO' STOP ;
'FOR' I:=H10-99 'STEP' 1 'UNTIL' H10 'DO'
X[I]:= X[I] - C4 ;
'FOR' P:=0 'STEP' 1 'UNTIL' 10 'DO'
'BEGIN'
C6:= 0 ;
'FOR' I:=H10-99 'STEP' 1 'UNTIL' H10-10 'DO'
C6:= X[I] * X[I+P] + C6 ;
C9:= C6*C8 ;
Y[H,P]:= C9 ;
'END';
'IF' H 'LESS' C10 'THEN' 'GO TO' SPR1 ;
PAGE;
WRITE('('
AUSWERTUNG ZU AUFNAHME NR ,.  ')');
TYPE(A);
WRITE('('
```

```
GESAMTANZAHL DER MESSPUNKTE ..  ')');
TYPE(N) ;
WRITE('('
DIFFERENZINTENSITAET D ..  ')');
TYPE(D);
S:= 0 ;
'FOR' H:=1 'STEP' 1 'UNTIL' C10 'DO'
S:= MW[H] + S ;
S:= S  /C10 ;
WRITE('('

ANZAHL DER TEILFOLGEN ZU 100 BZW, 90 PUNKTEN .. ')');
TYPE(C10);
WRITE('('

MITTELWERT DER GESAMTSERIE,.  ')');
PRINT(S);
WRITE('('

                                                ')');
D4:= 0 ;
D5:= 0 ;
'FOR' H:=1 'STEP' 1 'UNTIL' C10 'DO'
'BEGIN'
D1:= MW[H] - S ;
D2:= ABS(D1);
D3:= D2 * D2 ;
D4:= D2 + D4 ;
D5:= D3 + D5 ;
'END';
D6:= D4  /C10 ;
D7:= D5  /C10 ;
PRINT(D6);
WRITE('('      MITTL.ARITHM.ABW.DER TEILFOLGEN-MW VOM GESAMT-MW  ')');
PRINT(D7);
WRITE('('      ENTSPR.VARIANZ SIGMA=SIGMA


          P.,            AKF(/P/),,          AKF(/P/)NOR,,')');
WRITE('('       ARITHM.ABW,,        VARIANZ..          STREUUNG..
                                                          ')');
'FOR' P:=0 'STEP' 1 'UNTIL' 10 'DO'
'BEGIN'
C11:= 0 ;
'FOR' H:=1 'STEP' 1 'UNTIL' C10 'DO'
C11:= Y[H,P] + C11 ;
C12:= C11  /C10 ;
Z[P]:= C12 ;
'IF' Z[0] 'GREATER' 0 'THEN'
C23:= C12  /Z[0];
'ELSE'
'GO TO' STOP ;
C17:= 0 ;
C18:= 0 ;
'FOR' H:=1 'STEP' 1 'UNTIL' C10 'DO'
'BEGIN'
C13:= Y[H,P];
C14:= C13 - C12 ;
C15:= ABS(C14);
C16:= C15 * C15 ;
C17:= C15 + C17 ;
C18:= C16 + C18 ;
```

```
'END';
C19:= C17  /C16 ;
C21:= C18  /C16 ;
'IF' C21 'GREATER' 0 'THEN'
C22:= SQRT(C21)
'ELSE'
'GO TO' STOP ;
PRINT(P,Z[P],C23,C19,C21,C22);
'END';
STOP;
'IF' W 'LESS' 16 'THEN' 'GO TO' HI ;
'END';
```

```
'BEGIN'
'COMMENT' SAMPLING, AKF ;
'INTEGER' A,N,D,SB,AI,PE,PA,DASTA,DAT,
          I,J,JE,JEE,K,L,P,
          C100,C101,C102,C103;
'REAL' T,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,
       C11,C12,C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19,C20,
       C21,C22,C23,C24,C25,C26,C27,C28,C29,C30;
'INTEGER' 'PROCEDURE' TIME; 'CODE';
'ARRAY' F1,F2[1:2000],AKFV[0:100];

READ(DASTA);
READ(SB,AI,PE);
DAT:= 0 ;
WIED: DAT:= DAT + 1 ;

READ(A,N,D);
T:= TIME ;
'IF' T 'GREATER' 1100 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' 2000 'DO'  F1[I]:= 0 ;
'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' 2000 'DO'  F2[J]:= 0 ;
'FOR' P:=0 'STEP' 1 'UNTIL' 100 'DO' AKFV[P]:= 0 ;
'IF' N 'GREATER' 2000 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'IF' N 'LESS' 1 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'IF' PE 'GREATER' 100 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'IF' SB 'LESS' 1 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'IF' AI 'LESS' 1 'THEN' 'GO TO' STOP ;
C103:= (PE+2) * AI * SB ;
'IF' N 'NOT GREATER' C103 'THEN' 'GO TO' STOP ;

PAGE;
WRITE('('
AUFNAHME NR.: ')');
TYPE(A);
WRITE('('

ANZAHL DER EINGELESENEN MESSPUNKTE.: ')');
TYPE(N);
WRITE('('

DIFFERENZINTENSITAET.: ')');
TYPE(D);
WRITE('('
SAMPLINGBEREICH.: ')');
TYPE(SB);
WRITE('('  MESSPUNKTE, ENTSPRECHEND  ')');
C100:= 20 * SB ;
TYPE(C100);
WRITE('('  MUE,

ARITHMET.MITTEL DER EINGELESENEN WERTE.:
                                          ')');

C2:= 0 ;
'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO'
```

```
'BEGIN'
READ(F1[I]);
C1:= F1[I];
C2:= C1 + C2 ;
'END';
C3:= C2  /N ;
PRINT(C3);
WRITE('('

MODIFIZIERTE AUTOKORRELATIONSFUNKTION UEBER EINEN SAMPLINGBEREICH SB
BEI EINER INTERVALLAENGE VON  ')');
C101:= 20 * AI ;
TYPE(C101);
WRITE('('  MUE,

                                                                    ')');
WRITE('(' ZUSAETZLICH NORMIERT BZGL. GROESSERER ABSTAENDE
      P,,          AKFV(/P/),,          AKFVNOR(/P/),,       ')');
WRITE('(' AKFV2(/P/),,       AKFVNOR2(/P/),,
                                                          ')');
C4:= (N-SB)  /AI + 0.0001 ;
JE:= ENTIER(C4) ;
J:= -1 ;
SPR1: J:= J + 1 ;
K:= AI * J ;
C5:= 0 ;
'FOR' L:=1 'STEP' 1 'UNTIL' SB 'DO'
C5:= F1[K+L] + C5 ;
C6:= C5  /SB ;
F2[J+1]:= C6 ;
'IF' J 'LESS' JE-1 'THEN' 'GO TO' SPR1 ;
'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' JE 'DO'
F2[J]:= F2[J] * C3 ;
C7:= C3 * D ;
'IF' C7 'NOT GREATER' 0 'THEN' 'GO TO' STOP ;
'FOR' P:=0 'STEP' 1 'UNTIL' PE 'DO'
'BEGIN'
JEE:= JE - P ;
'IF' JEE 'NOT GREATER' 0 'THEN' 'GO TO' STOP ;
C8:= JEE * C7 * C7 ;
C9:= 1  /C8 ;
C10:= 0 ;
'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' JEE 'DO'
C10:= F2[J]*F2[J+P] + C10 ;
AKFV[P]:= C9 * C10 ;
'END';
C11:= AKFV[0];
'IF' C11 'NOT GREATER' 0 'THEN' 'GO TO' STOP ;
C12:= 1  /C11 ;
C16:= 0 ;
C17:= 0 ;
C26:= 0 ;
C27:= 0 ;
'IF' PE 'GREATER' 9 'THEN'
'BEGIN'
PA:= PE - 4 ;
C18:= 0 ;
'FOR' P:=PA 'STEP' 1 'UNTIL' PE 'DO'
C18:= AKFV[P] + C18 ;
C19:= C18  /5 ;
'END'
'ELSE'
```

```
C19:= AKFV(PE);
C21:= C11 - C19 ;
'IF' C21 'NOT GREATER' 0 'THEN' 'GO TO' STOP ;
C22:= 1  /C21 ;
'FOR' P:=0 'STEP' 1 'UNTIL' PE 'DO'
'BEGIN'
C102:= P * C101 ;
C13:= AKFV(P) ;
C14:= C13 * C12 ;
C23:= C13 * C10 ;
C24:= C23 * C22 ;
PRINT(C102,C13,C14,C23,C24);
C15:= ABS(C14);
C16:= C15 + C16 ;
C17:= C14 * C17 ;
C25:= ABS(C24);
C26:= C25 + C26 ;
C27:= C24 + C27 ;
'END';
WRITE('(
INTEGRALE UEBER DIE ABSOLUTBETRAEGE DER NORM, AKFV ,,
NICHT-NORMIERT          NORMIERT  BZGL.GROESSERER ABSTAENDE
                                                          ')');
PRINT(C16,C26);
WRITE('(
INTEGRALE UEBER DIE NORMIERTEN FUNKTIONEN AKFV ,,
NICHT-NORMIERT          NORMIERT  BZGL.GROESSERER ABSTAENDE
                                                            ')');
PRINT(C17,C27);

STOP;

'IF' DAT 'LESS' DASTA 'THEN' 'GO TO' WIED ;

'END';
```

Herrn Prof.Dr.Dr. Herbert Schober danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit.
Für die Fertigung der apparativen Teile sei Herrn Fichtler von der Institutswerkstatt gedankt.

Diese Arbeit wurde durch die Nutzungsmöglichkeit der Rechenanlage des Leibnitz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften gefördert.

Lebenslauf

Sieghard Gall

geboren am	7.2.1940
in	Niederlangenau, Kr.Hohenelbe (CSR)
Eltern:	Franz Gall, Schneidermeister Gertrud Gall, geb. Müller

Ausbildung:

1946 - 1950	Volksschule Billenhausen, Kr.Krumbach/Schwb.
1950 - 1959	Oberrealschule Krumbach/Schwb.
Juni 1959	Abitur, Oberrealschule Krumbach
Nov. 1959	Beginn des Studiums der Physik an der Universität München
Juli 1962	Diplom-Vorprüfung in Physik
Okt. 1964 - Okt. 1966	Experimentelle Diplomarbeit am Institut für med. Optik über das Thema: Die Streustrahlenverteilung hinter dem Streukörper des Röntgenphantoms und ihr Einfluß auf das Bildrelief.
Dez. 1966	Diplom-Hauptprüfung in Physik
Jan. 1967 - Dez. 1970	Anfertigung der vorliegenden Arbeit am Institut für med. Optik bei Prof. Schober
ab Jan. 1971	Industrietätigkeit bei der Firma Du Pont Fotowerke Adox GmbH.